



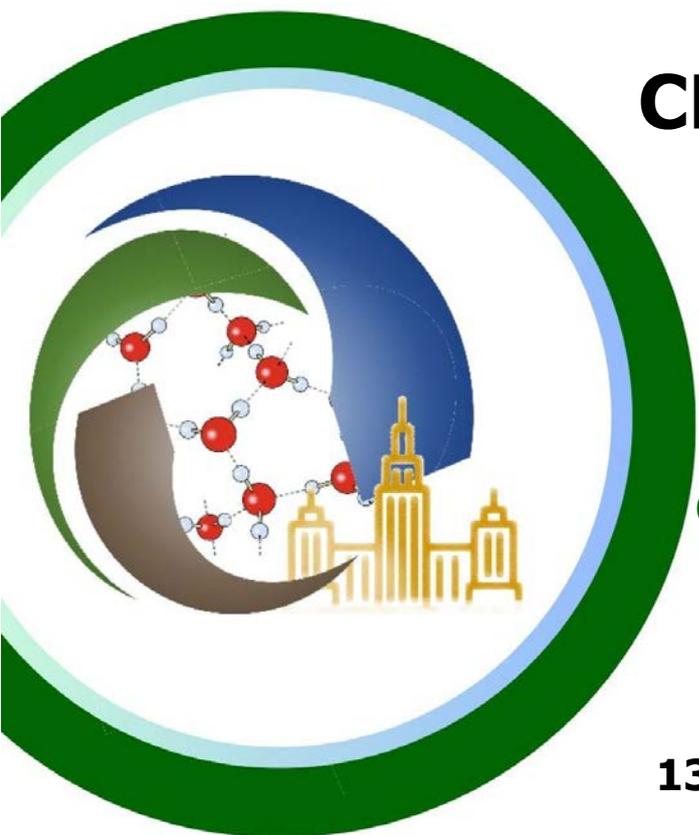
270 МГУ
1755 2025



1943
80 лет
КФМП
2023



ОБЩЕСТВО
ПОЧВОВЕДОВ
ИМЕНИ В.В. ДОКУЧАЕВА



СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

II МЕЖДУНАРОДНОЙ
МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОЙ НАУЧНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОНЦЕПЦИИ
ФИЗИКИ ПОЧВ: РАЗВИТИЕ,
СОВРЕМЕННЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ И
ПЕРСПЕКТИВЫ**

к 80-летию кафедры физики и
мелиорации почв МГУ имени М.В.
Ломоносова и
130-летию профессора Н.А. Качинского

Z ZION[®]
— ИОНИТНЫЙ СУБСТРАТ —

ЛАБ
Инструменты

УРАЛХИМ
ИННОВАЦИЯ



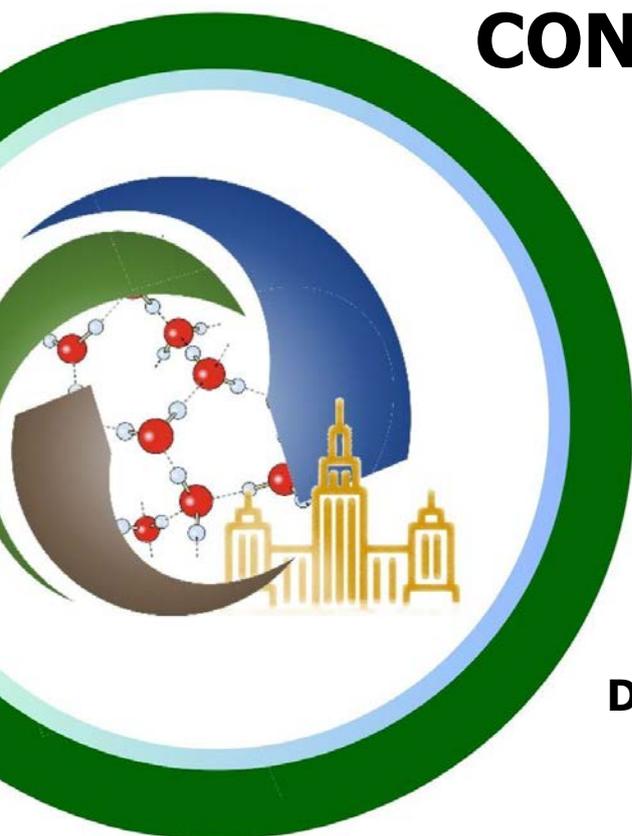
270 МГУ
1755 2025



1943
80 лет
КФирП
2023



ОБЩЕСТВО
ПОЧВОВЕДОВ
ИМЕНИ В.В. ДОКУЧАЕВА



CONFERENCE PROCEEDINGS

**II INTERNATIONAL INTERDISCIPLINARY
SCIENCE CONFERENCE**

**KEY CONCEPTS OF SOIL PHYSICS:
DEVELOPMENT, CURRENT
APPLICATIONS AND PROSPECTS**

**dated to the 80th anniversary of the
Department of Soil Physics and Reclamation
and 130th anniversary of
professor N.A. Kachinskiy**

ZION[®]
Испитный субстрат

ЛАБ
Инструменты

УРАЛХИМ
ИННОВАЦИЯ



УДК 613.4
ББК 40.3
С23

Рецензенты:

Мазиров Михаил Арнольдович – проф., д.б.н.,
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А.Тимирязева», каф. земледелия и методики опытного дела;

Сворцова Елена Борисовна – д.с.-х.н.,
ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В.Докучаева»,
лаборатория физики и гидрологии почв

Сборник научных трудов II Международной междисциплинарной научной конференции: «Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы», посвященной 80-летию кафедры физики и мелиорации почв МГУ имени М.В. Ломоносова и 130-летию профессора Н.А. Качинского, Москва, 25–31 мая, 2024: сборник статей и тезисов. – М.: «КДУ», 2024. – 699 с. – Электронное издание сетевого распространения. – URL: <https://bookonlime.ru/node/78096> – doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-00247-069-3-2024-699.

ISBN 978-5-00247-069-3

Сборник содержит материалы докладов, представленных на II Международной междисциплинарной научной конференции: «Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы», посвященной 80-летию кафедры физики и мелиорации почв МГУ имени М.В. Ломоносова и 130-летию профессора Н.А. Качинского. Научная программа конференции основана на междисциплинарности физики почв и посвящена вопросам современных и перспективных приложений фундаментальных концепций физики почв в почвоведении и смежных науках.

Материалы конференции размещены в авторской редакции. Редакция не вносила коррективы в научные статьи. Ответственность за информацию, опубликованную в материалах, представленных в сборнике, несут авторы.

All materials contained in the book, published in the author's version. The editors do not make adjustments in scientific articles. Responsibility for the information published in the materials on book, are the authors. The articles are placed in the author's edition.

Электронное издание сетевого распространения.

Адрес в сети Интернет: <https://bookonlime.ru/node/78096>

Объем данных 23.1 Мб. Опубликовано 18.10.2024.

Издательство «КДУ»: 8(495) 638-57-34. www.kdu.ru; www.bookonlime.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Умарова А.Б. НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ ПРОФЕССОРА КАЧИНСКОГО. К 130-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ	11
СТАТЬИ КОНФЕРЕНЦИИ	15
Абдуллаев А.Х. ИНФИЛЬТРАЦИЯ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ЗА ПРЕДЕЛЫ РАСЧЕТНОГО СЛОЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ	19
Азовцева Н.А., Парфенова А.М., Варламов Е.Б. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРБАНОЗЕМОВ	24
Алимов А.Л., Вышкварко А.А., Снегирев В.В., Ежелев З.С., Кокорева А.А. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННЫХ СЛОЕВ НА РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ	35
Анисимов В.С., Фесенко С.В., Анисимова Л.Н., Санжаров А.И., Мезина М.В., Коровин С.В., Крыленкин Д.В., Корнеев Ю.Н., Новикова Н.В. ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА ПОДВИЖНОСТЬ И НАКОПЛЕНИЕ ^{137}Cs РАСТЕНИЯМИ	39
Безуглова О.С., Гаевая Э.А., Горбов С.Н., Мищенко А.В. СТРУКТУРНО-АГРЕГАТНЫЙ СОСТАВ ЧЕРНОЗЕМА СТОКОРЕГУЛИРУЮЩЕЙ ЛЕСОПОЛОСЫ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ	47
Багбеков Р.К., Богданов А.Н., Фельдшеров Ю.В., Шахназаров А.А. ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ГИДРОИЗОЛИРУЮЩИХ ПОЛИМЕРНО-МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СОЗДАНИИ ИСКУССТВЕННЫХ ВОДОЕМОВ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ КАЗАХСТАНА	55
Вахонин Н.К. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, КАК ОСНОВА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАТИЗАЦИИ МЕЛИОРАТИВНОЙ ОТРАСЛИ	65
Гаевая Э.А., Безуглова О.С. АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВЕННОГО ПЛОДОРОДИЯ ЧЕРНОЗЕМОВ ОБЫКНОВЕННЫХ КАРБОНАТНЫХ СРЕДНЕ ЭРОДИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ	67
Golekar Rushikesh Baburao, Dakve Soham Mahendra, Kurdhundkar Shubham Shailesh, Nivate Sanjana Sanjay. SEAWATER INTRUSION IN COASTAL AQUIFER FROM RATNAGIRI AREA.INDIA AND ITS IMPACT ON QUALITY OF IRRIGATION WATER	80
Гончаров Н.В., Прокофьева Т.В., Федотов Г.Н. , Потапов Д.И. ТВЕРДЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ВЫПАДЕНИЯ КАК ИСТОЧНИК ГИДРОФОБНОСТИ ГОРОДСКИХ ПОЧВ (МОДЕЛЬНЫЙ ОПЫТ)	92
Горепекин И.В., Тарасенко Д.А., Федотов Г.Н. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СВОЙСТВ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ГЕЛЕЙ В ВЫСУШЕННЫХ ОБРАЗЦАХ ПОЧВ	102
Гумматов Н.Г. УЛУЧШЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЧВЫ ПОД КОРМОВЫМИ КУЛЬТУРАМИ В ОРОШАЕМЫХ И БОГАРНЫХ УСЛОВИЯХ	114



Деревенец Е.Н., Кулачкова С.А., Манакова О.И., Мешалкина Ю.Л., Сорокин А.С. <i>МИКРОБНОЕ ДЫХАНИЕ КАК ИСТОЧНИК ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА «ЧАШНИКОВО»</i>	120
Евдокимова М.В., Горленко А.С., Прудникова Е.В., Калита М.М. <i>ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МАРКЕРНЫХ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ УГЛЕДОБЫЧИ КОМПОНЕНТОВ В НАТИВНЫХ ПОЧВАХ И ИСКУССТВЕННЫХ СУБСТРАТАХ</i>	129
Железова С.В., Иванов Д.А. <i>ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОСТОЯНИЯ АГРОФИТОЦЕНОЗА В УСЛОВИЯХ ВСХОЛМЛЕННОГО РЕЛЬЕФА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ</i>	139
Звычайная Е. А., Ковалев И. В. <i>КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ОГЛЕЕННЫХ АГРОСЕРЫХ ПОЧВ И ОРТШТЕЙНОВ МЕТОДОМ ТОМОГРАФИИ</i>	149
Зубкова Т.А., Суханова Н.И. <i>УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЧВЕННЫХ АГРЕГАТОВ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ В УСЛОВИЯХ ВОДОРОДНОЙ ДЕГАЗАЦИИ ЗЕМЛИ</i>	158
Nazir Ikramov, Farkhod Kasimov, Mekhrbonu Rakhimova <i>ENERGY EFFICIENCY MONITORING SYSTEM OF OPERATED IRRIGATION PUMPING STATIONS IN UZBEKISTAN</i>	171
Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н. <i>ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ</i>	192
Ильичев И.А., Ольчев А.В., Романенков В.А., Покровская А.И., Сорокин А.С., Чекин М.Р., Решетникова Р.А. <i>ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА С ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ НА КАРБОНОВОМ ПОЛИГОНЕ «ЧАШНИКОВО»</i>	199
Исаева А.В., Гончарова О.Ю., Рыжова И.М. <i>ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА ЭМИССИЮ СО₂ ИЗ ПОЧВ ПОД ХВОЙНЫМИ И ЛИСТВЕННЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ БОТАНИЧЕСКОГО САДА МГУ</i>	208
Каверин Д.А., Пастухов А.В. <i>АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ВЛАЖНОСТИ ТУНДРОВЫХ ПОЧВ СЕВЕРО-ВОСТОКА ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ</i>	221
Кашулина Г.М., Литвинова Т.И. <i>ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СЕРОГУМУСОВЫХ ПОЧВ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ШПИЦБЕРГЕНА</i>	228
Ковалев И.В. <i>ОСУШЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ГИДРОМОРФНЫХ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ: ОПЫТ ПРОШЛОГО И ВЫЗОВЫ СОВРЕМЕННОСТИ</i>	235
Ковалева Н.О., Очирова Д.Д. <i>ПОЧВЕННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ КАК ОСНОВА АМПЕЛОПЕДОЛОГИИ (НА ПРИМЕРЕ ВИНОГРАДНИКОВ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ)</i>	245
Кожунов А.В. <i>ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ГРАНИЧНОГО УСЛОВИЯ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ</i>	253
Кокорева А.А., Колупаева В.Н., Славиогло В.Д., Бибулатов С.А. <i>ПЕРЕНОС ПЕСТИЦИДОВ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО СОДЕРЖАНИЯ ИХ В ПОЧВЕ ПО</i>	



<i>РЕЗУЛЬТАТАМ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЧЕРНОЗЕМЕ ВЫЩЕЛОЧЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОГО ЛИЗИМЕТРИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....</i>	<i>265</i>
Коркина Е.А. <i>СЕЗОННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ЛЬДА В ПОРАХ ПОЧВ КРИОМЕТАМОРФИЧЕСКОГО ОТДЕЛА</i>	<i>275</i>
Кочкина М.В., Солдаткина М.А., Сатосина Е.М., Ильичев И.А., Романенков В.А., Кременецкий В.В., Ольчев А.В., Гулев С.К. <i>ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И МЕТАНА НА БЕРЕГОВОМ УЧАСТКЕ КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА, КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ.....</i>	<i>284</i>
Кулачкова С.А., Деревенец Е.Н., Максаева Е.С. <i>СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ ПОЧВ ГОРОДСКИХ ГАЗОНОВ</i>	<i>292</i>
Лапина Л.Э. <i>ОБ АМПЛИТУДАХ ГОДОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ И СРЕДНЕГОДОВЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ</i>	<i>301</i>
Линник В.Г., Иваницкий О.М., Савельев А.А. <i>МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАТЕРАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ВЛАГИ НА МИКРОЛАНДШАФТНОМ УРОВНЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЗИЯ-137 в ПОЛУГИДРОМОРФНЫХ ПОЧВАХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ</i>	<i>306</i>
Липатов Д.Н., Манахов Д.В., Щеглов А.И. <i>ВАРЬИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ В ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ ЗАБОЛОЧЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ ОСТРОВА САХАЛИН</i>	<i>314</i>
Макаров О.А. <i>ПОЧВА КАК НАЗЕМНОЕ БИОКОСНОЕ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОЕ «ПОТОКОВОЕ» ТЕЛО, НЕЛИНЕЙНО ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЕ ВО ВРЕМЕНИ И В ПРОСТРАНСТВЕ</i>	<i>324</i>
Манакова О.И., Сорокин А.С., Мешалкина Ю.Л. <i>ПРОФИЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОЧВ В БЕРЕЗОВО-ЕЛОВОМ ЛЕСУ УОПЭЦ МГУ «ЧАШНИКОВО»</i>	<i>331</i>
Минкина Т.М., Замулина И.В., Манджиева С.С., Невидомская Д.Г., Бауэр Т.В., Бурачевская М.В., Цицуашвили В.С. <i>МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ZN И CU С ТВЕРДОФАЗНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ПОЧВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ, РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА</i>	<i>339</i>
Молчанов А.Г., Ольчев А.В. <i>БАЛАНС УГЛЕРОДА БЕРЕЗОВО-ИВОВОГО БИОГЕОЦЕНОЗА НА ОСУШЕННОМ БОЛОТЕ</i>	<i>345</i>
Остроумов В.Е. <i>МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ СИНГЕНЕТИЧЕСКОГО ВЕЧНОМЕРЗЛОГО ОСАДКА С ПОГРЕБЕННЫМИ ПОЧВАМИ</i>	<i>357</i>
Поляков Д.Г., Архангельская Т.А., Рябуха А.Г., Ковда И.В. <i>ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ КАК ФАКТОР УСТОЙЧИВОСТИ ПАЛЕОКРИОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА</i>	<i>366</i>
Решоткин О.В. <i>ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ ОСТРОВА САХАЛИН В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ.....</i>	<i>377</i>
Романенков В.А., Мешалкина Ю.Л., Горбачева А.Ю., Добровольская В.А. <i>МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕКВЕСТРАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЧВ УПРАВЛЯЕМЫХ АГРОЭКОСИСТЕМ</i>	<i>384</i>



Русаков А.В., Попов А.И. ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ЯРОСЛАВСКОГО ПОВОЛЖЬЯ	392
Рыжова И.М., Романенков В.А., Степаненко В.М. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ: ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ	403
Самсонова В.П., Кондрашкина М.И., Кротов Д.Г., Дядькина С.Е. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОТНОСТИ ПАХОТНОГО ГОРИЗОНТА АГРОСЕРЫХ ПОЧВ БРЯНСКОГО ОПОЛЬЯ	414
Сапожников П.М., Корсикова С.А., Кононцева Е.В., Данилова Н.И. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ КАДАСТРОВОЙ СТОИМОСТИ ЧЕРНОЗЕМОВ АЛТАЙСКОГО КРАЯ	419
Сатыбалдин М.А., Яковлева Л.В. ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕМНО-КАШТАНОВЫХ ПОЧВ ПОД ЛЕСОМЕЛИОРАТИВНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ РАЗНОГО ВОЗРАСТА В АЛГИНСКОМ РАЙОНЕ АКТЮБИНСКОЙ ОБЛАСТИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН	428
Симонова Ю.В. ИЗОТЕРМЫ СОРБЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА И ПЛОЩАДЬ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ПОЧВ В ОПЫТЕ С УДАЛЕНИЕМ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА	436
Стулина Г.В., Солодкий Г.Ф., Кенжабаев Ш.М. АДАПТАЦИЯ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ К УСЛОВИЯМ ПРИАРАЛЬЯ	447
Сухарев А.И., Тарасенко Д.А. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ГЕЛЕЙ ПОЧВ В ИЗУЧЕНИИ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ	459
Сушкова С.Н., Дудникова Т.С., Минкина Т.М., Замулина И.В., Барбашев А.И., Антоненко Е.М., Шуваев Е.Г., Лацынник Е.С. ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПАУ И ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ НА СВОЙСТВА КАШТАНОВЫХ ПОЧВ И СОЛОНЦА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ	470
Тарасенко Д.А. ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ВОДОУСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЫ	481
Тимофеева Е.А. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «CASE-STUDY» ЧЕРЕЗ КОЛЛАБОРАЦИЮ СНО-ВУЗ-РАБОТОДАТЕЛИ В МГУ ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАПРОСОВ ОРГАНИЗАЦИЙ	493
Tusat E., Er F., Mikailsoy F. USAGE OF GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS IN DIGITAL SOIL MAPPING; A CASE STUDY OF YESILTEPE-AKSARAY-TURKIYE	497
Тюгай З., Салимгареева О.А., Иванов А.В. СТРУКТУРА ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО МОЩНОГО РАЗНОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ	505
Федотов Г.Н., Тарасенко Д.А., Горепекин И.В. ВЛИЯНИЕ ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ НА НЕКОТОРЫЕ ИХ СВОЙСТВА	514



Ферапонтова С.А. РОЛЬ ИОНИТНЫХ СУБСТРАТОВ КАК ИСТОЧНИКА МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПРОВОКАЦИОННОГО ФОНА	527
Харитонов Г.В., Шейн Е.В., Крутикова В.О., Климин М.А. ВТОРИЧНЫЕ КАРБОНАТЫ ТОРФЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВЕРХОВОГО ТИПА	532
Хирк А.В., Хайдапова Д.Д., Карпова Д.В. ОСОБЕННОСТИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АГРОСЕРЫХ ПОЧВ ВЛАДИМИРСКОГО ОПОЛЬЯ	537
Холопов Ю.В., Хайдапова Д.Д., Лаптева Е.М. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ ЕСТЕСТВЕННОГО И НАРУШЕННОГО СЛОЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТИПИЧНОЙ ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ	546
Царёва М.В. ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННОГО КУРИНОГО ПОМЕТА НА АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ	555
Шейн Е.В., Дембовецкий А.В., Тюгай З.Н., Женис Жансая. СТАТИСТИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА СЕДИМЕНТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ (ISP+) С МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ	559
Шехтер К.П., Сапожников П.М. ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ КАДАСТРОВОЙ СТОИМОСТИ ЧЕРНОЗЕМОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РОССИИ	566
Юлдашев Г., Исагалиев М., Гончаров В.М., Мамажонов И. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АРИДИЗАЦИИ И МЕЛИОРАЦИИ ПОЧВ С МЕТАМОРФИЧЕСКИМИ ГОРИЗОНТАМИ	583
СТАТЬИ МОЛОДЕЖНОГО ФОРУМА	589
Аракелов Л.И., Умарова А.Б. СРАВНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СРЕДНЕСУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ МОСКВЫ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ В КОНТЕКСТЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА	590
Волкова Е.С., Пятова А. А. ВЛИЯНИЕ ЦЕОЛИТА И УДОБРЕНИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ НА АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР	598
Клименко В.С., Исаева А.Н., Куприянова Ю.В., Ниязова А.В., Сиуха А.В., Ильясов Д.В. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКОВ СО₂ С ПОВЕРХНОСТИ ОЛИГОТРОФНОГО БОЛОТА ТЕСТОВОГО ПОЛИГОНА МУХРИНО	604
Сидорова И.Я., Ковалева Н.О. МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КАК МАРКЕРЫ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕОАРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ	615



Силаев М.В., Ахметзянова Р.Р., Ежелев З.С. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ И ВЛАЖНОСТНОЙ РЕЖИМЫ ВЕРХНЕГО СЛОЯ УРБАНОЗЕМА ПОД РАЗНЫМИ МУЛЬЧИРУЮЩИМИ СУБСТРАТАМИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД	625
Тазиева А.О., Ахметзянова Р.Р., Мельцаева А.М., Умарова А.Б. ИЗМЕНЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ВЕРХНИХ СЛОЕВ ПОЧВ ЛИЗИМЕТРОВ МГУ В ДЛИТЕЛЬНОМ АСПЕКТЕ	635
Чжан Ичжоу, Евдокимова М.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ В ЦЕЛЯХ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНО НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ТЕРРИТОРИЙ	643
ТЕЗИСЫ КОНФЕРЕНЦИИ	654
Said Al-Ismaily, Anvar Kacimov, Ahmed Al-Mayhai, Hamed Al-Busaidi, Daniel Blackburn, Afrah Al-Shukaili, Ali Al-Maktoumi, Buthina Al-Siyabi, and Jamal Al-Habsi. "SOIL SKILLS" AND "SOIL JUDGING" CONTESTS AMALGAMATED: PEDAGOGICAL ADVENTURE IN BSC FIELD PRACTICUM	655
A. Al-Shukaili, A.R. Kacimov, A. Al-Mayahi, S. Al-Ismaily, A. Al-Maktoumi, H. Al-Busaidi, D. Menezes-Blackburn. MOISTURE-VEGETATION RELATIONSHIPS OF LINEAR ARID DUNES; ASH SHARQIAH HIGH SANDS, OMAN	657
Blackburn, D.M., Al-Maghatasi B.K., Al-Ismaily S. IMPACT OF BIOCHAR, ORGANIC FERTILIZERS AND ELEMENTAL SULFUR ON THE EMISSION OF GREENHOUSE GASES FROM AN OMANI CALCAREOUS SOIL	660
Ming Hung Wong. ORGANIC MATTER INCORPORATION IN SOILS: PROMOTING SUSTAINABLE AGRICULTURE AND CLIMATE CHANGE MITIGATION	661
Романенко К.А., Толстыгин К.Д., Силаев М.В., Герке К.М. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ FIB-SEM ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ	665
Садовникова Н.Б., Смагин А.В., Кривцова В.Н. ВЛИЯНИЕ ГЕЛЬ-ФОРМИРУЮЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОЧВОМОДИФИКАТОРОВ НА АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ И ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР	667
Слуковская М.В., Иванова Т.К., Мосендз И.А., Кременецкая И.П., Сачивко Е.П. РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОДОУДЕРЖИВАЮЩИХ СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННЫХ ПЕСКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И ТЕРМОВЕРМИКУЛИТА	669
Смагин А.В. ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАСКЛИНИВАЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОСНОВНОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ КРИВОЙ ПОЧВ ВО ВСЕМ ДИАПАЗОНЕ ВЛАЖНОСТИ	671
Степанов А.Л., Сошникова Е.А., Манучарова Н.А. НОВЫЕ ПРОЦЕССЫ МИКРОБНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ АЗОТА КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПОЧВ	674
Тесля А.В., Гурина Е.В., Яшников А.В., Степанов А.А., Васильченко А.С. ЭМИССИЯ СО₂ ПОЧВОЙ, ОБРАБОТАННОЙ ГЛИОТОКСИНОМ	676



Файкин Г.М., Степаненко В.М., Медведев А.И., Шангареева С.К. АПРОБАЦИЯ НА ТРЁХ МОДЕЛЯХ УГЛЕРОДА КОНСТРУКТОРА МОДЕЛЕЙ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА	678
ТЕЗИСЫ МОЛОДЕЖНОГО ФОРУМА	682
Аракелова Л.И. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ РАЗНОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ОКРУГА СОЧИ.....	683
Валяев Д.А., Иванова А.Е., Садыков А.Н., Умарова А.Б. ГРИБЫ В СОСТАВЕ ПЫЛИ, ОТОБРАННОЙ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ, В РЯДЕ ГОРОДОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ.....	685
Иовчева А.Д., Пинский Д.Л. ОСОБЕННОСТИ АППРОКСИМАЦИИ ИЗОТЕРМ В СЛУЧАЕ АДСОРБЦИИ МЕДИ ПОЧВАМИ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ.....	687
Корытина М.А., Гончаров В.М., Фаустова Е.В., Чуфаровская О.И. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУБСТРАТОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ КАК ОСНОВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗЕЛЁНОЙ КРОВЛИ.....	690
Фарходов Ю.Р., Данилин И.В., Ермолаев Н.Р., Надуткин И.А., Холодов В.А. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ПОСЕВА НА СТРОЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО	693
Фортова С.М. ВЛИЯНИЕ БИОЧАРА НА ТРАНСФОРМАЦИЮ УГЛЕВОДОРОДОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ В МИКРОМОДЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ.....	694



НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ ПРОФЕССОРА КАЧИНСКОГО. К 130-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ

Умарова А.Б.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация, a.b.umarova@gmail.com

SCIENTIFIC HERITAGE OF PROFESSOR KACHINSKII. TO THE 130TH ANNIVERSARY OF THE BIRTH

Umarova A.B.

Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: The II International Scientific Conference "Fundamental Concepts of Soil Physics: development, modern applications and prospects" coincided with the anniversary of the outstanding scientist Nikodim Antonovich Kaczynski, to whose memory this event was dedicated. N.A. Kaczynski, founder and first head of the Department of Physics and Soil Reclamation, was one of those classical scientists of Russian science, serving which was his life's work. His colleagues and students noted his outstanding organizational skills and human qualities – hard work and dedication to his work. Many fundamental directions of soil physics, methodological approaches and methodological developments, including instruments and evaluation indicators of physical properties of soils adopted in soil science, were developed by N.A. Kachinsky or with his direct participation

II Международная научная конференция: «Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы» совпала с юбилеем выдающегося ученого Никодима Антоновича Качинского, памяти которого было посвящено это мероприятие, состоявшееся в стенах факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова.

Н.А. Качинский, основатель и первый заведующий кафедрой физики и мелиорации почв, был одним из тех ученых-классиков отечественной науки, служение которой было делом всей его жизни. Множество фундаментальных направлений физики почв, методологических подходов и методических разработок, полевых и лабораторных приборов, оценочных показателей, принятых в почвоведении, были разработаны Н.А. Качинским или при его непосредственном участии. Никодим Антонович является выдающимся ученым советской эпохи, сумевшим создать и развить отечественную физику почв как науку, лидирующую на мировой арене почвоведения. Соратники и ученики отмечали его исключительные организаторские способности и человеческие качества, трудолюбие и увлеченность своим делом.

Н.А. Качинский (рис.1) родился 12 ноября 1894 г. в городе Ставрополь в семье ссыльного польского повстанца, участника восстания 1963 года (Научное наследие ..., 1977).

Свое профессиональное образование Никодим Антонович начал с получения диплома учителя, окончив в 1917 г. Ставропольский учительский институт. Это сыграло немалую роль в его педагогическом таланте, позволившем в дальнейшем взрастить целую плеяду выдающихся учеников. Он продолжил свое обучение в Петровской (ныне Тимирязевской) академии в Москве, которую окончил в 1922 году.



Рис. 1. Н.А. Качинский (1894-1976). Фотография из архива кафедры физики и мелиорации почв

С 1921 г. Н.А. Качинский работал на Московской областной сельскохозяйственной опытной станции в должности помощника заведующего отделом, который возглавлял до 1930 г. Удивительное время востребованности ученых в стране и их активной деятельности, зачастую требовавшее ведения множества различных направлений работы. Так, Никодим Антонович одновременно являлся заведующим лабораторией физики почв в Почвенно-агронômическом отделе Московского почвенного комитета, а с 1923 г. начал работать в Московском университете на кафедре почвоведения (рис.2) и заведовать сектором физики почв НИИ почвоведения МГУ.



Рис. 2. Профессора и студенты почвенно-географического факультета. Выпуск 1938 г. Архив кафедры физики и мелиорации почв.



Широкий круг научных интересов, базирующихся на генетическом подходе к исследованию почв, был связан, в том числе, и с особенностями развития отечественного почвоведения. Во вступительной статье к книге Н.А. Качинского «Корневая система растений в почвах подзолистого типа» (1925) Александр Павлович Левицкий, который в то время являлся председателем научного совета МОСХОЗ, писал, что «в связи с отсутствием достаточного интереса со стороны работников агрономии к почвоведению и метеорологии эти науки развивались самобытными путями и устанавливали методику, не считающуюся со специальными требованиями и заданиями агрономического знания. Несомненно для судеб самой науки почвоведения это обстоятельство имело свои весьма положительные стороны, так как отчасти именно поэтому, а отчасти благодаря обширности своего поля наблюдений, русское почвоведение развилось до роли самостоятельной науки, равноправной в ряду других отраслей естествознания в отличие от западно-европейского «порошковедения» трактующего почву лишь в качестве среды для сел.-хоз. культурных растений» (Качинский, 1925, стр. 4).

Генетический Докучаевский подход к исследованию почв во всей сложности анализа ее функционирования явился основой для научного поиска в работах Никодима Антоновича. В одной из своих ранних работ он проводит анализ работ А.А.Измаильского, В.Г. Ротмистрова, П.В. Отоцкого, Г.Н. Высоцкого и др. по исследованию влажности почв (Качинский, 1923), в которых отбор почвенных образцов влажности осуществлялся последовательно по глубинам от дневной поверхности почв. Шаблоном расстояния между пробами являлись 10-15 см. Качинский обратил внимание, что большинство работ были проведены в черноземной области, где «отсутствует резкая дифференция почвы на составляющие ее горизонты» (Качинский, 1925, стр. 7), и указывает на работу С.К. Чаянова, который, несмотря на использование общепринятого тогда подхода, сделал вывод, что «каждая более или менее отличная почва имеет свой ход влажности», что ведет к важности изучать «морфологию разреза» (цит. по Качинскому, 1924, стр. 7). Поэтому, по утверждению Н.А. Качинского, вследствие индивидуальности физических, химических и других свойств отдельных горизонтов почв «единственно правильным будет водный режим почвы, в частности, влажность, как и все другие свойства ее, изучать по отдельным генетическим горизонтам» (Качинский, 1924, стр.7). На основе исследований одного 1921 г, когда им было проанализировано 440 проб, Никодим Антонович убедительно доказывает, что варьирование в пределах генетических горизонтов ниже изменения средних значений влажности по профилю.

Научные интересы Н.А. Качинского многочисленны, разноплановы и комплексны. Одной из приоритетных тем его исследований была почвенная структура: практически в каждой работе присутствуют отсылки, гипотезы, объяснения, доказательства, связанные со спецификой структурных характеристик почв. В работе, касающейся методов исследования влажности почв и ее оптимальных значений, он указывает на необходимость определения влажности исходя «из влагоемкости почвы с ненарушенной структурой» (Качинский, 1923, стр.13). Фундаментальный итог работ Никодима Антоновича по почвенной структуре сконцентрирован в его книге (Качинский, 1963), в которой он анализирует более чем 150-летнюю историю изучения взаимосвязи структуры почв с почвенным плодородием от работ И.М. Комова до В.В. Докучаева и Костычева. В ней он высказывает критические замечания в адрес работ В.Р. Вильямса, представляет коагуляционную теорию структурообразования К.К. Гедройца. Качинский провел детальный анализ методов и условий оструктурирования почв, включая способы использования различных высокомолекулярных соединений для создания т.н. искусственного клея, в том числе, основываясь на собственных экспериментах,



выделяя преимущества и недостатки тех или иных структуров. Это позволило ему сделать ряд важнейших выводов, являющихся актуальными и в настоящее время, определяющих экологическую и экономическую целесообразность их применения.

Среди важнейших работ Никодима Антоновича необходимо выделить двухтомник «Физика почв», изданный последовательно в 1965 и 1970 гг., явившимся одновременно научным трудом и учебником для многих поколений почвоведов. Он написан на высоком научном уровне, включает теоретические дискуссионные вопросы тех годов, содержит прикладные приложения фундаментальных положений науки и методические разработки по исследованию физических свойств и режимов почв, значительная часть из которых является авторской.

Конечно, в кратком обзоре сложно охватить весь спектр научного наследия Никодима Антоновича, однако выделим на наш взгляд важнейшие, ключевые моменты. Это работы по твердой фазе почв, в первую очередь, по анализу гранулометрического и структурного состава почв. Они являются на сегодняшний день базовыми как в почвоведении, так и сопредельных науках. Необходимо отметить, что наряду с фундаментальными аспектами изучения данных свойств, Никодим Антонович разработал и внедрил методы пробоподготовки и определения содержания элементарных почвенных частиц и микроагрегатов, водоустойчивости агрегатов, классификацию границ гранулометрических фракций и состава, основанную на докучаевском генетическом подходе к рассмотрению почв.

Н.А. Качинский выполнил серию работ по методологии изучения физических свойств почв, приведя все методы в стройную систему, выпустил ряд руководств по определению физических свойств почв, подготовил комплексный курс физики почв, включавший теоретические лекции и практические занятия по изучению физических свойств почв полевыми и лабораторными методами. Методика физических исследований, разработанная Н.А. Качинским, на десятки лет определила развитие физики почв, выдвинув отечественную науку на лидирующие позиции в мире, и способствовала широкому применению исследований физических свойств почв в практических работах.

Полноценные аналитические обзоры научных публикаций, проведенные Никодимом Антоновичем, включают не только в научную, но и в учебную литературу. Они получились очень полемичными и дискуссионными, касаются методических подходов по изучению тех или иных свойств почв, включают объяснения различных противоречий. Это сделало его научные работы невероятно увлекательными, читатель вовлекается в анализ излагаемого, мысленно становясь участником дискуссии.

Качинский в своих работах демонстрировал очень уважительное и бережное отношение к своим коллегам, ученикам, аналитикам, упоминая их в своих работах и тем самым выделяя и подчеркивая их профессионализм, что, по сути, демонстрировало высокий уровень и качество проведенного исследования. Кроме того, он был до щепетильности корректен – любой рисунок и фотография в его книгах и статьях имеют ссылку на автора.

Никодим Антонович вел и большую просветительскую деятельность. Увлекательнейшая книга «Почва, ее свойства и жизнь» (1946), предназначенная для широкого круга читателей, включает тем ни менее множество профессиональных терминов и понятий, анализ многих процессов, происходящих в почве. Само повествование начинается со знакомых природных явлений, незаметно усложняясь. А большое количество иллюстраций, в том числе, собственных рисунков и фотографий, делают даже сложный текст понятным и доступным.

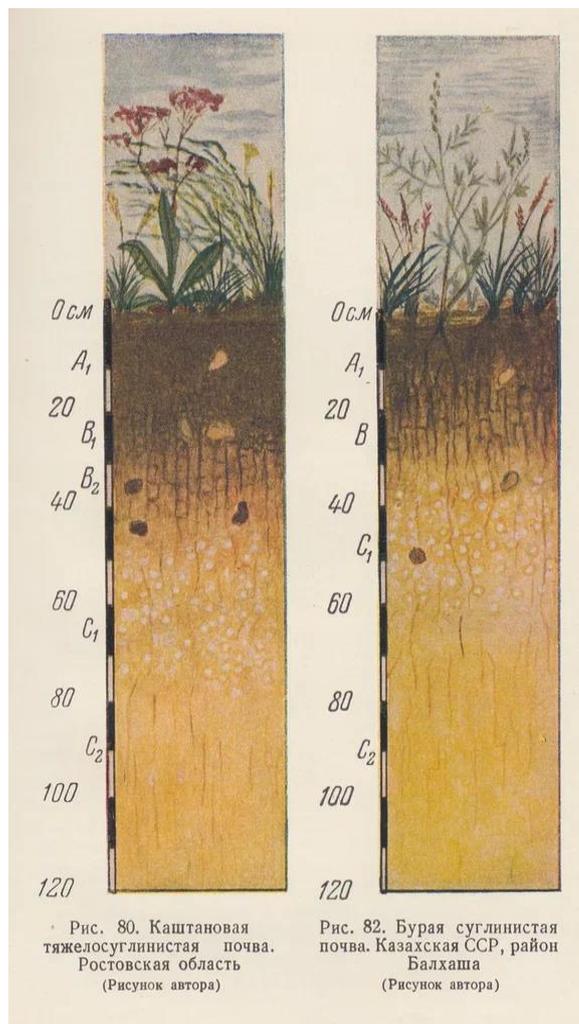
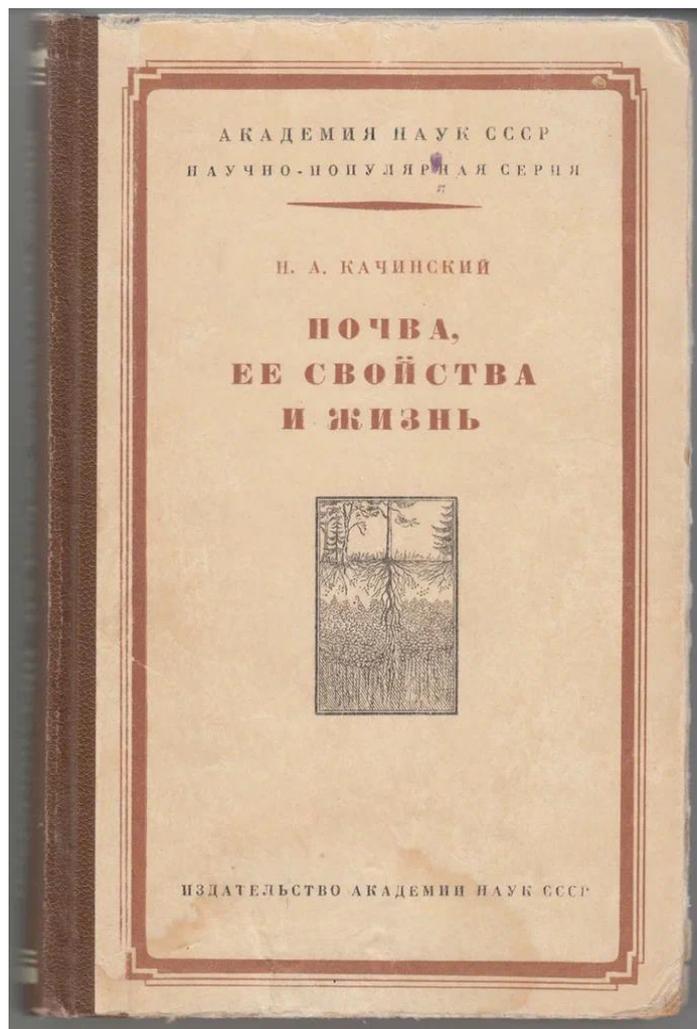


Рис. 3. Обложка и фрагмент книг Н.А. Качинского. Архив кафедры физики и мелиорации почв

Безусловно, столь глубокое понимание функционирования такой сложной системы как почва связано и с многочисленными экспедициями, которыми он руководил в разные годы своей жизни, полевой материал которых послужил источником множества теоретических, прикладных и методических работ (<https://www.livelib.ru/author/519364-nikodim-kachinskiy?ysclid=lwffzpw4pl790974506>). Это обследования почв в Среднем и Нижнем Заволжье (1932–1934), пустынной равнине Богаз Азербайджана (1934–1935) для изыскания возможностей их орошения, работы в Кутулукском массиве по строительству оросительной системы (1945–1947), проведение обследования почв для подбора чаепригодных земель (1950–1953), испытания успешности работы комбайнов в Кубанской и Омской областях (1947–1948); почвенно-мелиоративные работы на основе результатов Волго-Донской (1947–1950), Волго-Ахтубинской почвенно-мелиоративных экспедиций (1950–1953), работы по мелиорации почв Зейско-Буреинского междуречья для создания сырьевой базы на Дальнем Востоке (1953–1956), руководство Камской экспедицией в связи со строительством Камской ГЭС (1955–1957) и Волгоградской экспедицией по полезащитному лесоразведению (1949–1976).



Рис. 5. Сотрудники кафедры физики и мелиорации почв 1970-е годы.

(1) А.Ф. Вадюнина, (2) Н.А. Качинский, (3) А.Д.Воронин, (4) аспирантка кафедры, (5) Е.Е.Журавлева, (6) Н.Н. Налетова, (7) З.А.Корчагина, (8) А.Г.Гаель, (9) А.И. Плясова, (10) Л.В. Михайлова, (11) Н.Ф. Вороновский, (12) А.И Мосолова, (13) Л.Б. Боровинская, (14) Л.О. Карпачевский, (15) З.Н. Громова, (16)..(17) Е.А. Дмитриев, (18) А.С. Манучаров, (19) И.И. Судницын, (20) Ф.Р. Зайдельман, (21) М.С. Кузнецов, (22) В.В. Зайцев, (23) В.Я. Григорьев, (24) Л.Ф. Смирнова, (25) Г.П.Глазунов

Архив кафедры физики и мелиорации почв

Личные дневники Никодима Антоновича, сохранившиеся в архиве кафедры физики и мелиорации почв, изобилуют не только заметками и размышлениями о тех или иных процессах и характеристиках почв, полемическими спорами с отечественными и зарубежными учеными, но и большим количеством рисунков, выполненных цветными карандашами и акварелью.

Целый ряд работ Н.А. Качинского не был опубликован, вероятно, они представляли собой труды, имеющие закрытый характер в то непростое время. Однако, согласно летописи МГУ (<https://letopis.msu.ru/peoples/2735?ysclid=ly8p1oybif304194348>) известно, что летом 1941 года под его руководством была создана комплексная бригада для решения проблемы закрепления грунта и научной разработке аэродромов для легких самолетов и аварийных водоёмов, в которую вошли видные специалисты — почвоведы, ботаники и климатологи из Московского университета и учреждений Академии наук СССР. Профессора Н.А. Качинский и А. Ф. Вадюнина предложили несколько конструкций наливных водоёмов и нефтёмов. В октябре 1941 г. научный коллектив был эвакуирован в Туркмению, где было проведено всестороннее изучение различных почв в целях постройки аэродромов, осуществлено их опытное строительство для проверки разработанных методов закрепления почвы и предлагаемых способов борьбы с пылью на лётных полях, испытаны различные методы создания противofильтрационной одежды на водоёмах, в том числе, путём формирования слоистых экранов из торфа, песка, глины. На основе разработанной теории был создан ряд водоёмов и в черте Москвы.



Никодим Антонович был награжден орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, медалями «За доблестный труд в Великой Отечественной войне», «За оборону Москвы», «Большой золотой медалью им. В.В.Докучаева» и являлся Заслуженным деятелем науки и техники РСФСР (1971). Им опубликовано порядка 250 работ, в том числе, 20 монографий, 2 учебников по физике почв, исторического очерка «Агрономия и почвоведение в Московском университете за 200 лет», научно-популярной книги «Почва, ее свойства и жизнь», В Московском университете он долгие годы читал авторские курсы «Физика почвы» и «Мелиорация почв». Им сконструировано 14 приборов и предложено множество методов для изучения физических и физико-механических свойств почвы, некоторые из которых отмечены премиями Всесоюзной сельскохозяйственной выставки и золотой медалью ВДНХ. Н.А.Качинский подготовил 75 кандидатов и более 20 докторов наук.

Несомненно, Никодим Антонович Качинский – создатель и первый заведующий кафедры физики и мелиорации почв (рис. 4) и один из выдающихся ученых-почвоведов целой плеяды ярчайших ученых-учителей, обусловившие расцвет отечественной науки на многие годы вперед, результаты исследований которых продолжают быть актуальными и в настоящее время.

Основные труды Н.А.Качинского:

«Влажность почвы и метод её определения. Руководство для метеорологических пунктов и станций» (1932), «Материалы к выяснению вопроса о структуре почвы» (1933), «Почвенно-мелиоративный очерк равнины Богаз в Азербайджане» (1937), «Почва как фактор, определяющий условия работы сельскохозяйственных машин. Исследования 1937–1939 гг.» (1940), «Методы механического и микроагрегатного анализа почвы» (1943), «Происхождение и жизнь почвы» (1945), «Опыт агрофизической характеристики почв на примере Центрального Урала» (соавт., 1950), «Почва, её свойства и жизнь» (1951), «Структура почвы. Итоги и перспективы изучения вопроса» (1963), учебник «Физика почвы» (1965); «Агрономия и почвоведение в Московском университете за 200 лет. 1755–1955. Краткая история» (1957), «Агрономия и почвоведение в Московском университете за 200 лет. 1770–1970» (1970).

Литература:

Корневая система растений в почвах подзолистого типа (исследование в связи с водным и питательным режимом почв) Часть 1. Изд-во Моск. обл. сел.-хоз. опытной станции, Москва, 1925 г. 126 с.

Методы механического и микроагрегатного анализа почв. Изд-во Академии наук Союза ССР. Москва - Ленинград. 1943. 39 с.

О влажности почв и методах ее изучения. Издание 2-е. Изд-во Наркозема «Новая деревня». Москва, 1924, 60 с.

О влажности почв и методах ее изучения. Изд-во Наркозема «Новая деревня». Москва, 1923, 40 с.

Почва. ОГИЗ. СЕЛЬХОЗГИЗ. 1946. 160 с.

[Светлой памяти выдающегося ученого Никодима Антоновича Качинского. Почвоведение. 1977. №6. С. 174-175.](#)

Структура почвы (итоги и перспективы изучения вопроса). Изд-во МГУ. 1963. 101 с.

Физика почв. Часть 1. Изд-во «Высшая школа». 1965. 320 с.

Физика почв. Часть 2. Изд-во «Высшая школа». 1970. МГУ. 359 с.

<https://letopis.msu.ru/peoples/2735?ysclid=ly8p1oybif304194348>

<https://www.livelib.ru/author/519364-nikodim-kachinskij?ysclid=lwffzpw4pl790974506>



СТАТЬИ КОНФЕРЕНЦИИ



ИНФИЛЬТРАЦИЯ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ЗА ПРЕДЕЛЫ РАСЧЕТНОГО СЛОЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

Абдуллаев А.Х.

¹Государственное учреждение институт «Гидрогеологии и инженерной геологии»,
Республика Узбекистан, г.Ташкент, anvar1955@rambler.ru

INFILTRATION OF IRRIGATION WATER BEYOND THE CALCULATED LAYER DEPENDING ON SOIL MOISTURE

Abdullaev Anvar Khaydarovich

Institute “Hydrogeology and Engineering Geology” State Corporation, Uzbekistan, Tashkent
anvar1955@rambler.ru

Annotation: The article discusses the infiltration of irrigation water during cotton irrigation. Irrigation norms are overestimated by 1.5-2 times and reach 1.5-2 thousand m³/ha and higher. Irrigation norms for cotton often exceed 12000 m³/ha, whereas according to hydromodule zoning, norms of 4000-5000 m³/ha are established. The depths of water infiltration beyond the cotton root layer are calculated at different pre-irrigation soil moisture. It has been established that the crop yield does not depend on high soil moisture.

Введение

Основной проблемой Узбекистана стала высокая степень засоленности земель. К этому привело не рациональное использование земельных и водных ресурсов, бесконтрольный полив хлопчатника, переувлажнение почв, что сопровождалось подъемом уровня грунтовых вод и вторичным засолением земель.

Сельское хозяйство Узбекистана является основным потребителем водных ресурсов, оно забирает на орошение от 85% до 90% от общего объема водных ресурсов республики. Преобладающая их часть 80-83% затрачивается в вегетационный период. В не вегетационный период вода используется для орошения озимых культур, запасных и влагозарядковых поливов и для промывки засоленных земель. Годовое потребление составляет 54,5 млрд. кубических метров.

При использовании засоленных земель или земель подверженных засолению в сельскохозяйственном производстве в Республике Узбекистан был рекомендован промывной водный режим в целях предотвращения засоления земель, интенсивностью 20-30% от оросительной нормы нетто при наличии дренажа и поддержание уровня грунтовых вод на глубине 2,5-3 метра (Айдаров, 1985; Борьба с засолением..., 1967; Панкова, 2016).

Данный способ полива, который требовал большое количество дополнительных водных ресурсов в начальные периоды освоения земель действительно способствовал к уменьшению солей в корнеобитаемом слое. Однако используемый в республике промывной водный режим за очень короткий срок эксплуатации из-за несоблюдения необходимой технологии орошения способствовал подъему уровня грунтовых вод, вторичному засолению и резкому увеличению объема дренажного стока.

Примерно через 15 лет после начала орошения площади с глубиной залегания зеркала грунтовых вод выше 5 м стали преобладающими и составили более 95% орошаемых земель. На некоторых областях республики на 65% орошаемых землях уровень грунтовых вод находится на глубине менее 3,0 м от поверхности почвы. В республике подтоплено от 35% до 50% орошаемых земель (Панкова, 2016).



Причины засоления могут быть различными, но в настоящее время причиной засоления земель является подъем уровня соленых грунтовых вод вследствие избыточного полива.

Объекты и методы исследований

Исследования по оценке использования поливных вод были проведены на сероземно-луговых почвах Кашкадарьинской области республики Узбекистан.

Сероземно-луговые почвы развиты в гидроморфных условиях, имеют слабое увлажнение грунтовыми водами с глубины 2,5–5 м, отличаются от других луговых почв по генезису и общей направленности процессов засоления и рассоления, а также уровнем плодородия почв. Они подвержены природному и вторичному засолению и ирригационной эрозии.

Климатические условия являются типичными для пустынной зоны и характеризуется резко выраженной континентальностью. Высокая среднегодовая температура воздуха и её резкие суточные колебания, жаркое сухое лето, незначительное количество атмосферных осадков и высокая испаряемость определяют характер климатических условий.

По данным Каршинской метеорологической станции за последнее десятилетие среднегодовая температура воздуха составила 16-18,9°C. Максимальная температура воздуха наблюдается в июне-июле и составляет 28-38°C, а минимальная – в декабре-январе месяцах и колеблется в пределах 1-5°C, суммы эффективных температур составляют 5000–6000°C.

Максимальная влажность воздуха 62-82% фиксируется обычно в зимний период, а минимальная 25-35% в летний.

Гидрогеологические условия

Гидрогеологические условия определяются особенностями геологического, геоморфологического строения, климатическими условиями и историей геологического развития. В строении Кашкадарьинского гидрогеологического района принимают участие водоносные горизонты и комплексы, приуроченные к отложениям четвертичного, неогенового, палеогенового возрастов. Грунтовые воды формируются за счёт подземного притока и инфильтрации оросительных и речных вод.

Расходование грунтовых вод происходит, в основном, на подземный отток в сторону современной долины р. Амударья, где отмечается региональная разгрузка грунтовых вод большей части территории.

Накопление солей в почво-грунтах и грунтовых водах идет в основном в зонах недостаточной дренированности и отрицательно влияет на рост и развития сельхозкультур.

Общий уклон поверхности на север и северо-запад.

При выполнении настоящих исследований были использованы классические общепризнанные полевые, экспериментальные и аналитические методы, которые позволили рассчитать максимально эффективное использование местных ресурсов вод. Расчет инфильтрации воды за пределы расчетного слоя проводился по фактическим данным, полученным на местах, которые были рекомендованы министерством сельского и водного хозяйства республики. Полевые и лабораторные исследования проводились в соответствии с методическими пособиями [Шейн и др, 1988, Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв, 2001).



Мелиоративное состояние исследуемых орошаемых земель характеризуется средней и низкой степенью засоленности. По степени засоления средне- и слабозасоленные, тип засоления хлоридно-сульфатный и сульфатно-хлоридный.

Минерализация грунтовых вод в среднем 2,9 г/л, очень незначительно изменяется в сезонном разрезе.

Накопление солей, связанное с орошением сельскохозяйственных угодий, вызывается привнесением солей поливной водой который также способствует поднятию уровня соленых грунтовых вод.

Гранулометрический состав этих почв легко- и среднесуглинистый, количество фракций физической глины колеблется от 30% до 54%. Объемная масса изменяется от 1,32 г/см³ до 1,48 г/см³. Полевая влагоемкость исследуемых почв колеблется от 22% до 26%, водопроницаемость характеризуется невысоким (0,3-0,1 м/сут) коэффициентом фильтрации.

Одним из важнейшим условием рационального использования оросительной воды является гидромодульное районирование орошаемой территории, т.е. деление территории на таксонометрические единицы с целью высокоэффективного использования земельно-водных ресурсов и установления научно-обоснованных, дифференцированных режимов орошения, обеспечивающих получение стабильно высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Гидромодульное районирование должен учесть изменений природно-климатических и почвенных условий, произошедших за последний период, в связи с изменением уровня грунтовых вод, мелиоративного состояния земель.

В Кашкадарьинской области поливы хлопчатника в основном бороздковые, они мало производительны при доле ручного труда 90–100%. Для исследуемой орошаемой почве характерна низкая продуктивность использования оросительной воды.

Результаты и обсуждение

По гидромодульному районированию для исследуемых почв были установлены оросительные нормы 4100-5200 м³/га при 4-5 поливах (Тураев, 2003). Однако, в целях поддержания промывного водного режима, в реальных условиях оросительные нормы составляли от 9000 м³/га до 11000 м³/га при 5-6 поливах, т.е. они превышали рекомендованные по гидромодульному районированию в два и более раз. При таких высоких поливных нормах поливная вода помимо насыщения расчетного слоя также неэффективно фильтровалась в более глубокие слои. Так, при разных оптимальных влажностях, установленных для хлопчатника, (влажность почвы не ниже 65% и 70% от полевой влагоемкости (ПВ)) при поливной норме до 1900 м³/га глубина проникновения воды была глубже расчетного слоя (0-100 см) и доходила до глубины 150 см.

При применяемых поливных нормах инфильтрация воды за пределы расчетного слоя отмечается даже при влажности почвы близкой к дефициту влаги (50% от ПВ) (рис.1).

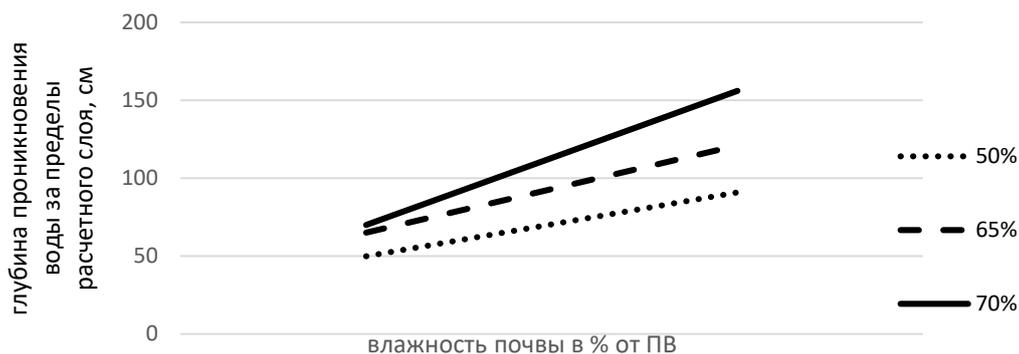


Рис.1 Глубина проникновения оросительной воды за пределы расчетного слоя при поливной норме 2000 м³/га

Резкое увеличение инфильтрации отмечается при поливной норме выше 1900 м³/га., в этом случае оросительная вода проникает на глубину 130-150 см. ниже расчетного слоя (рис.2).

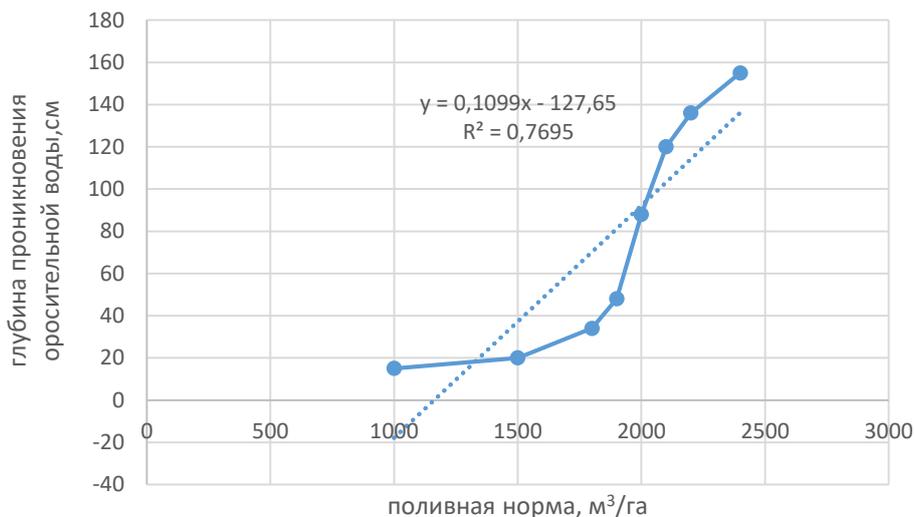


Рис. 2 Глубина проникновения оросительной воды за пределы расчетного слоя (0-100см) почвы при различной поливной норме, см

Высокие поливные нормы не оказывают влияние на урожайность хлопчатника. Высокие урожаи хлопчатника (29,4 ц/га против были 24,4 ц/га) отмечены при более низких оросительных нормах, но не ниже, чем 65% от полевой влагоемкости почв.

Выводы

В настоящее время существующие технологии распределения воды по орошаемой площади страдают от неудовлетворительного управления системой орошения и ее неудовлетворительного состояния, нехватки квалифицированных кадров и специалистов по вопросам рационального использования водных ресурсов в сельском хозяйстве.



Решение проблемы, связанной с водными и земельными ресурсами возможно при оценке современного мелиоративного состояния орошаемых земель и грунтов подверженных техногенному воздействию, динамики уровня залегания грунтовых вод.

Для сохранения водных ресурсов необходимо разработать и внедрить комплексные методы рационального управления ресурсами, усовершенствовать планирование орошения и распределению воды для орошения.

Научно обоснованные рассчитанные оросительные нормы для хлопчатника для почв повышенной водопроницаемости составляет от 6000 до 7500 м³/га. при 6 поливах, а для тяжелых почв низкой водопроницаемости от 8000 до 9200 м³/га.

Выполнение работ по сокращению непроизводительных потерь воды на инфильтрацию при поливах позволяет сэкономить до 20-40% оросительной воды.

Литература

- Айдаров И.П. Регулирование водно-солевого и пищевого режимов орошаемых земель. М.: Агропромиздат. 1985 г. 275с.
- Борьба с засолением орошаемых земель. Научные труды ВАСХНИЛ. М.: Колос.1967 г. 213 с.
- Панкова Е.И. (2016) Засоление орошаемых почв среднеазиатского региона: старые и новые проблемы. *Аридные экосистемы* том 22, 4 (69), 21-29.
- Тураев А.А. Использование новых водосберегающих технологий при поливе сельскохозяйственных культур. Ташкент. Изд-во «Манавият». 2003, 276с.
- Шеин Е.В., Березин П.Н., Капинос В.А. Задачник по физике почв. Издательство МГУ, Москва, 1988 г. 81 с.
- Шеин Е.В. (ред.). Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв. М.: Изд-во МГУ, 2001 г. 200 с.



УДК 631.43:414.045:631.437.8

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ УРБАНОЗЕМОВ**Азовцева Н.А.¹, Парфенова А.М.², Варламов Е.Б.¹¹ ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Российская Федерация
azovtseva@mail.ru, evgheni968@rambler.ru²Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
parf_07@mail.ru

PHYSICO-CHEMICAL AND MINERALOGICAL CHARACTERISTICS OF URBANOZEMS

Azovtseva N.A.¹, Parfenova A.M.², Varlamov E.B.¹¹ FGBNU Federal Research Center V.V. Dokuchaev Soil Institute, Moscow, Russian Federation² Lomonosov MSU Department of Chemistry, Moscow, Russian Federation

Annotation: The paper presents the results of assessing the physico-chemical and mineralogical characteristics of soils in test plots in two districts of the North-Eastern Administrative District of Moscow, subject to intense anthropogenic load. Strength characteristics are determined depending on humidity, the granulometric and mineral composition of layer-by-layer (in 5 cm increments) horizons is considered, and data on magnetic characteristics are given.

Введение

В условиях возрастающей урбанизации территорий Российской Федерации и увеличивающейся вместе с ней численности городского населения становится необходимым всестороннее многоплановое исследование урбанозёмов в режиме мониторинга их физико-химических и минералогических характеристик, изменяющихся во времени и под антропогенной нагрузкой. Структура почвы определяет её потребительские свойства, помимо плодородия, водно-физических параметров, обуславливает прочность. Для города это выражается в отсутствии пыления, влиянии на влагоемкость почв, кроме того, устойчивая почвенная структура определяет поступление и закрепление в верхних слоях почв веществ, поступающих в нижние слои атмосферы в виде аэрозолей и твёрдых атмосферных осадков в результате деятельности автомобильных магистралей и промышленных предприятий. В работах авторов (Vlasov D.V., et cetera, 2022; Azovtseva N.A. et cetera, 2020), выполненных с применением регрессионного анализа, показано, что текстурой почвы контролируется накопление химических элементов в почве, наряду с геохимическим положением, типом дороги и реакцией почвы.

Для почв города характерны как естественные поверхностно нарушенные почвы, так и собственно городские почвы, сформированные или искусственно созданные урботехногенными процессами (глубокопреобразованные антропогенные почвы и урботехноземы) (Строганова М.Н., 1997; Гладышева, 2007). Среди почв городских парков значительное место занимают урбаноземы (урбостратоземы), (Urbic Technosol по WRB, 2014). Несколько последних десятилетий проблеме исследования и классификации городских почв было посвящено множество научных трудов (Прокофьева Т.В. и др., 2014; Бахматова К.А. и др., 2022). В нашей работе мы принимаем название – урбанозёмы. Урбанозёмы – почвы изменяющиеся, подвергающиеся постоянным преобразованиям и нагрузкам. Состояние урбанозёмов обеспечивает комфортное проживание людей. Эти почвы необходимо изучать, вести мониторинговые исследования в соответствии с Законом города Москвы (Закон города Москвы..., 2015). Нужен комплексный подход. Устойчивость



к нагрузкам (механическим, химическим, к выветриванию, к действию влаги) во многом зависит от гранулометрического состава. Влияет расположение почв в городском ландшафте. В селитебной жилой зоне распространены урбаноземы слабо- и среднегумусированные и слабо-, среднемошные. В промышленной зоне почвы представлены химически загрязненными индустриземами на насыпных и привозных грунтах, частично сохраняются урбаноземы, в понижениях распространены торфяно-болотные почвы. Мелкими участками фрагментированы интруземы (вокруг некоторых АЗС), в районах новостроек распространены урботехноземы, а наиболее сохранный почвенный покров находится в городских лесах и лесопарках, где распространены дерново-подзолистые и дерново-урбоподзолистые почвы на моренном и покровном суглинках, песчано-супесчаных отложениях, местами перекрытых покровными суглинками, а в понижениях представлены торфяно-болотные и дерново-подзолистые оглеенные и глеевые почвы (Строганова М.Н. и др., 1997).

Основным элементом городских экосистем является почва (Карпачевский Л.О., 2009) с присущей ей сложноорганизованной структурой. Почвенная структура обеспечивает рост и развитие растений. Ведущая роль структуры почвы выражается в урожае (Медведев, 2008) и влиянии агрегатов почвенной структуры на экологические функции почв: снабжение водой организмов, живущих в почве, биоразнообразие, биоремедиацию, консервацию углерода.

Выделяют основные взаимосвязанные направления изучения почвенной структуры (Умарова и др., 2021), среди которых весомое значение имеет необходимость мониторинга структуры почв (Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А., 1986; Yudina A.V., Kuzyakov Y.A., 2023), определение её качества. Одним из методов определения качества структуры почв, является изучение её механической прочности (Горбунов Н.И., Абрикова Л.П., 1974; *Теории и методы...*, 2007). Еще одним методом исследования структуры почв является изучение реологических свойств почвы и их связи со структурными параметрами (Абрикова В.В., 1988; Khaidarova D.D., et cetera, 2018).

Озеленение и благоустройство в современных городах делает все более актуальными изучение свойств и функций почвенных конструкций (Смагин и др., 2006; Смагин, 2012). Востребовано предложение к использованию способов улучшения почвенной структуры.

В условиях мегаполиса становится необходимым развитие методов доступного, информативного, компактного исследования прочностного и ферромагнитного состояния почв. Целью работы послужило комплексное исследование физико-химических свойств и минералогических характеристик верхних слоёв городских почв (0 -20 см от поверхности почвы).

Объекты и методы

Объектом исследования явились почвы двух тестовых территорий в городе Москве, подвергающиеся разной степени антропогенной нагрузки. Данные исследования являются частью цикла работ, проведённых авторами на почвах этих тестовых территорий в 2017-2022 годах. Исследования городских почв (TechnoUrbic) были проведены летом-осенью в 2021 года в Северо-Восточном административном округе города Москвы, почвы которых подвергаются загрязнению выбросами промышленных предприятий и автомобильных магистралей, расположенных в непосредственной близости от трансека с точками пробоотбора. Исследования почв участков тестовых территорий были проведены методом трансекты и ключевым методом в точках Т1, Т2, Т3, Т4, Т5. Образцы почв отбирали послойно (шаг 4 см) из верхних горизонтов почв исследуемых участков до глубины 24 см



буром пробоотборником AMS (США) в трёхкратной повторности. Почвы представлены урбаноэмами гумусированными средне- и сильномоющими на культурном (техногенном) слое, подстилаемом покровными суглинками расположенными на морене (Azovtseva N.A. et cetera, 2020).

В качестве фона были выбраны урбодерново-подзолистые почвы на флювиогляциальных отложениях рекреационной зоны парка (50 м от пруда), окаймляемой с запада ул. Салтыковской (Новокосино, ВАО г. Москвы). Всего было отобрано 120 смешанных проб в трёх повторностях. В 2021 году были исследованы городские почвы участков с разным уровнем антропогенной нагрузки в районах Новокосино ВАО, Свиблово СВАО г. Москвы (Состояние почвенного покрова города Москвы...), 14 тестовых точек на трёх глубинах: 0-7 см, 7-14 см, 14-21 см.

Была исследована пластическая прочность пенетрационным методом с помощью конического пластомера (Гросс Е.Е. и др., 2013) в 7-ми кратной повторности образцов почв тестовых территорий, как показатель их устойчивости. Координаты точек исследования на тестовых территориях представлены в таблице 1.

Таблица 1. Положение точек исследования тестовой территории СВАО г. Москвы

Номер точки	Приблизительное положение	Широта, (град)	Долгота, (град)	Высота, (м)
T1	Парк у МФЦ "Бабушкинский"	55,85687	37,669	142,1
T2	Парк у МФЦ "Бабушкинский"	55,85725	37,66916	145,6
T3	Парк у МФЦ "Бабушкинский"	55,85735	37,6694	158,4
T4	Вблизи ж/д станции Лосиноостровская	55,85616	37,67328	148,8
T5	Вблизи ж/д станции Лосиноостровская	55,85596	37,67296	153,3
T6	Завод ЖБК Ростокино вблизи пр. Мира д. 211	55,8487	37,6586	145,3
T7	Завод ЖБК Ростокино вблизи Золотого Вавилона	55,84829	37,65825	149

Определение гранулометрического состава почв точек в районе Новокосино и тестовых точек было проведено с помощью лазерного анализатора размеров частиц Microtrac Bluewave Microtrac Inc. (США).

В целях улучшения прочностных характеристик верхних слоёв урбаноэмов авторами было предложено использовать природный полисахарид хитозан, который был внесён в разных концентрациях в модельные составляющие почв тестовых территорий в модельном эксперименте. В следующем модельном эксперименте было исследовано влияние на прочность почв и модельные составляющие почв внесение в них хитозана и гумусовых препаратов.

Хитозан (поли-(1-4)-2-амино-2-дезоксиглюкан) является частично дезацетилованным производным хитина, который входит в состав оболочек насекомых, водных животных, клеточной стенки дрожжей, водорослей и грибов. Производные хитозана входят в состав гумуса почв (Орлов Д.С., 1985). Хитозан обладает уникальными сорбционными, ионообменными, хелатообразующими и комплексообразующими свойствами (Shariatmadari N. et cetera, 2020; Parfenova A. et cetera, 2021). Была показана его антибактериальная, антивирусная и иммуностимулирующая активность. Хитозан активно



используется в сельском хозяйстве. Хитозан обладает свойствами активного комплексообразователя, что возможно использовать при проведении фиторемедиации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами путём извлечения металлополлютантов из почвы с помощью растений (Azovtseva N.A. et al., 2004).

Результаты и обсуждение

Исследования гранулометрического состава показало, что почвы из точек Т1 и Т2 по гранулометрическому составу близки (преобладает пылевая фракция во всех горизонтах), почвы из Т4 и Т5 гранулометрически близки – преобладает песчаная фракция (Рис. 4).

В таблице 2. представлены результаты измерений прочности почв в сухом состоянии для тестовых территорий в районах Свиблово и Новокошино г. Москвы.

Прочность почв из двух тестовых районов отличалась из-за гранулометрического состава почв в сухом состоянии (табл. 2), была определена для образцов всех почв по трём глубинам: 0-7 см, 7-14 см, 14-21 см в семикратной повторности.

Таблица 2. Прочность почв тестовых территорий в районах Свиблово и Новокошино г. Москвы со средним квадратичным отклонением, повторность n=7

№ точки на	Глубина взятия образцов почв, тестовой территории h, см	Прочность,	Ср.кв.откл., n=7
Свиблово			
Т6	h=0-7	0,0667	0,0018
Т6	h=7-14	0,0806	0,0037
Т6	h=14-21	0,0757	0,0012
Т7	h=0-7	0,0679	0,0042
Т7	h=7-14	0,0696	0,0043
Т7	h=14-21	0,0794	0,0083
Новокошино			
Т1	h=0-7	0,0623	0,002
Т1	h= 7-14	0,07	0,0032
Т1	h=14-21	0,07	0,0033
Т3	h=0-7	-----	-----
Т3	h=7-14	0,064	0,0014
Т3	h=14-21	0,0797	0,0025
Т4	h=0-7	0,067	0,0012
Т4	h=7-14	0,067	0,0018
Т4	h=14-21	0,0692	0,0022

Прочность почв во влажном состоянии была определена для всех почв тестовых участков для двух глубин: 0–7 см, 7-14 см в семикратной повторности. На графиках зависимости прочности почвенных образцов верхних слоёв почв из Новокошино и Свиблово от влажности почвы наблюдается отчетливая разница прочности в зависимости от глубины залегания горизонтов. Это связано, с гранулометрическим составом почв (Рис. 1, Табл. 2). Следует отметить, что изменения прочностных характеристик по слоям почвенного профиля, полученные для городских почв тестовых участков, согласовывались с результатами модельных экспериментов в системе глина-песок, проведенных авторами (Рис. 2, Рис. 3).



Для увеличения прочности верхних слоёв городских почв и улучшения их структурного состояния было предложено использование хитозана как почвенного структурообразователя. Был проведен модельный эксперимент с использованием хитозана внесенного в пасту круглого песка в виде растворов разной концентрации и в пасту песка люберецкого как модельной минеральной почвенной составляющей при разной влажности модельного субстрата с модификацией песка ГК. (Рис. 4; Рис. 5, Рис. 6).

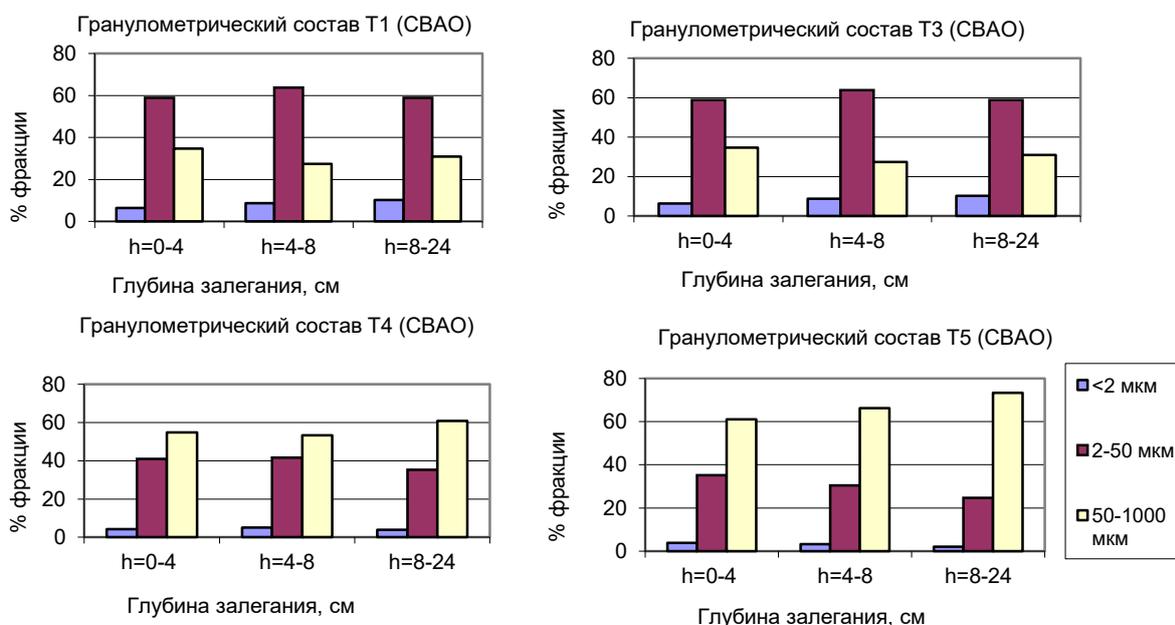


Рис. 1. Гранулометрический состав верхних слоёв почв тестовой территории СВАО г. Москвы.

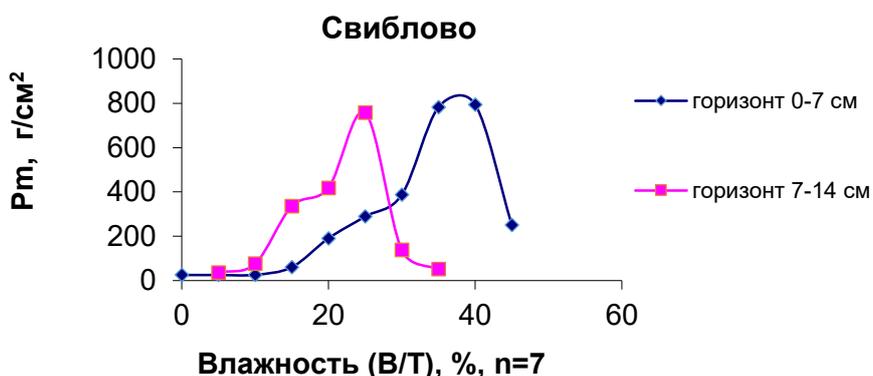


Рис. 2. Зависимость прочности почвенных образцов верхних слоёв почв из Свиблово от влажности почвы.

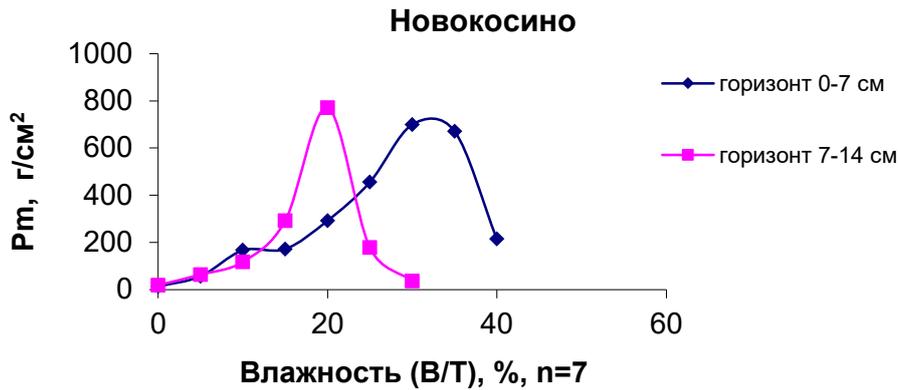


Рис. 3. Зависимость прочности почвенных образцов верхних слоёв почв из Новокозино от влажности почвы

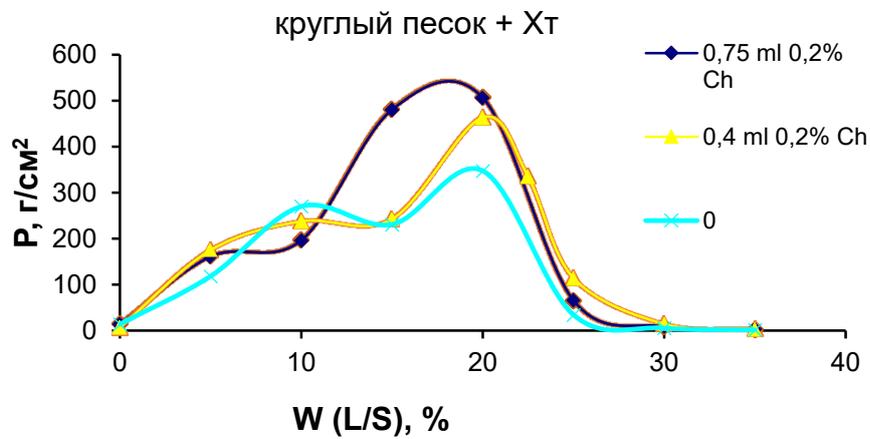


Рис. 4. Действие хитозана, внесенного в разных концентрациях, на пластическую прочность круглого песка, в зависимости от влажности.

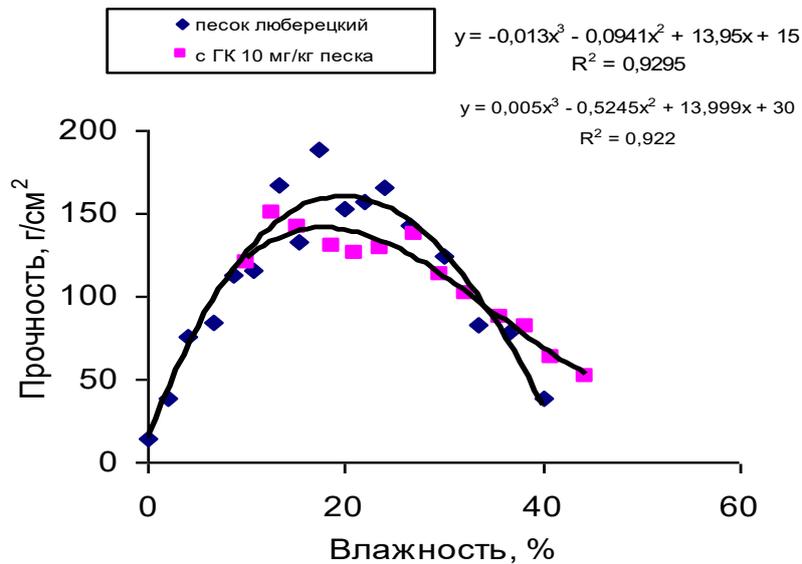


Рис. 5. Действие добавки гуминовой кислоты (ГК) на прочность песка люберецкого в зависимости от влажности.

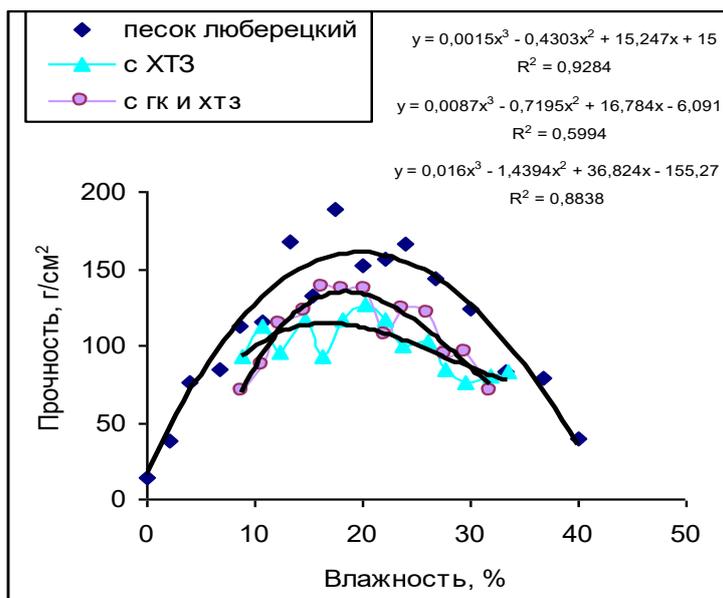


Рис. 6. Действие добавления хитозана в песок и песчаную пасту, модифицированную ГК, на их прочность, где: 1 -песок; 2 -песок, модифицированный ГК; 3 -песок, модифицированный ГК с добавлением хитозана.

Прочность почв зависит, в числе прочего, от их ферромагнитного состояния, зависящего и от поступления в почву большого количества загрязняющих веществ, тяжелых металлов. Аккумуляция и миграция тяжелых металлов в почвенном профиле требует изучения, для дальнейшей очистки от металлополлютантов, отрицательно влияющих на рост и развитие растений в городской среде (Состояние почвенного покрова города Москвы...). Почвенный магнетизм является ведущим фактором взаимосвязи почвенных параметров: содержания в почве железа и общего количества металлов в почвенном профиле, содержания и распределения гумуса в слоях почв (Ширкин Л.А. и др., 2012; Васильев А.А. и др., 2019; Азовцева Н.А., Парфенова А.М., 2024). Был разработан прибор (регистрационный номер № 2021666155/69) названный «Магнитометр ВОЛНА-2» (Азовцева Н.А., Францев В.В., 2021). Прибор способен измерять магнитное поле Земли над поверхностью и в толще почвы с привязкой к географическим координатам и времени. Измерения выполнены в пятидесятикратной повторности с использованием разработанного авторами пакета программ (Азовцева Н.А., Францев В.В., 2020; Азовцева Н.А., Францев В.В., 2022). Было проведено исследование изменения значений магнитной индукции с глубиной почвенного профиля в почвах тестовых территорий.

Таблица 3. Соотношение минералов во фракции < 1 мкм

	Содержание минералов во фракции, %.						
	Каолинит	Амфиболы Роговая обманка	Хлорит	Слюды	КШШ	Плагиоклазы	Кварц
Образец 2 «Новокосино»	2	7	16	25	11	6	5
Образец 3 «Свиблово»	6	17	0	53	12	0	0



Прочностные свойства почв зависят от их минералогических характеристик, которые в 2022 году были исследованы в Лаборатории минералогии и микроморфологии почв ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт имени В.В. Докучаева для почв городских тестовых территорий. Методами минералогических исследований был изучен состав глинистых и кластогенных фракций $<1\text{ мкм}$. Ансамбль качественного состава минералов в почвах зависит от многих факторов, из которых важнейшим является расположение почвы относительно источника очага переноса пыли или особенностей минералогического состава исходного почвенного субстрата. Методами минералогических исследований изучен состав фракций $<1\text{ мкм}$ наиболее контрастных в морфологическом отношении образцов. Фракционное разделение проведено по методике Горбунова (1963) путем последовательного исчерпывающего отмучивания. Минералогический состав исследовали с помощью универсального рентгенифрактометра HZG-4a. Качественный состав минералов установлен по известным рекомендациям (Рентгеновские методы и структура 1965; Градусов 1967; Соколова и др. 2005). Количественный анализ проведен по соотношению основных минеральных фаз (Дриц В.А., Сахаров Б.А., 1976). В таблице 3 показан поликомпонентный минералогический состав фракции $<1\text{ мкм}$ изученных образцов, представленный контрастным составом глинистых и микронной размерностью кластогенных минералов.

Выводы

Антропогенные почвообразующие породы имеют существенные отличия от естественных почвообразующих пород, как по составу, так и по строению. Главным отличительным их признаком является гетерогенный состав и строение, кроме того, они содержат значительное количество включений. Минералогическим анализом установлено, что в составе тонкодисперсной фракции $<1\text{ мкм}$ присутствуют в значительном количестве кластогенные минералы, а также кальцит. Данный факт можно связать с глубокой физической диспергацией исходного почвообразующего субстрата. По-видимому, высокое содержание кластогенных минералов в илистой фракции связано с запредельной антропогенной нагрузкой, в результате которой происходит глубокое физическое дробление почвенной массы, нельзя исключать и синлитогенного поступления пыли. Ансамбль качественного состава минералов в почвах зависит от многих факторов из которых важнейшим является расположение почвы относительно источника очага переноса пыли или особенностей минералогического состава исходного почвенного субстрата. Данные минералогического исследования образцов, представленных на анализ, и значительное отличие минералогического состава между ними свидетельствуют о разном источнике их происхождения. Вызывает много вопросов наличия незначительного количества глинистых минералов и полное отсутствие минералов смектитового типа с набухающей (лабильной решеткой). Данный компонент является обязательным для почв городской среды.

Прочностные измерения верхних почвенных слоёв в почвах в урбосреде являются способом наблюдения за экологической устойчивостью городских почв.

Проведенные в данной работе модельные исследования с использованием природного полисахарида хитозана, выявили увеличение прочностных характеристик модельных почвенных составляющих. Введение хитозана к песку, предварительно обработанному ГК, повышает прочность данной почвенной составляющей, что перспективно для улучшения прочностных характеристик структуры верхних слоёв почв. Мы установили, что в верхнем слое почв на глубине 20 см почвенного профиля происходит изменение магнитных свойств



почв. Происходит согласованное изменение влажности в верхних слоях почвенного профиля и значений магнитных характеристик почв. Преобладающее присутствие минералов с жесткой каркасной структурой в составе фракции <math><1\text{ мкм}</math> образцов является не свойственной этой фракции особенностью (образ. 2). Факт присутствия набухающих глинистых минералов подтверждается только по образцу 1, по образцу 2 глинистые минералы с набухающей структурой не диагностированы. Высокое содержание кварца и кальцита (образ. 2) на фоне незначительного количества слоистых глинистых силикатов и полное отсутствие минералов с набухающей кристаллической структурой может свидетельствовать о специфических характеристиках почвообразующего минерального субстрата. Отсутствие минералов с набухающей структурой можно объяснить быстрым удалением их из горизонтов как наиболее быстро мигрирующей из профиля части ансамбля почвенных минералов. Главной особенностью минералов всех образцов является сохранение в составе обломочного состава тонкодисперсной размерности кластогенных минералов.

Благодарность

Работа осуществлена в рамках государственного задания № 075-01477-22-00 Минобрнауки России на 2022 г. и плановый период 2023 и 2024 гг., темы 0439-2022-0013, государственного задания «Коллоидная химия» (номер ЦИТИС 121031300084-1) и государственного задания «Экология» (номер ЦИТИС:122040600057-3).

Литература

- Абрукова В.В. Связь реологических свойств почв со структурными характеристиками. М., 1988, 128 с.
- Азовцева Н.А., Парфенова А.М. (2024) Электромагнитные параметры почв и особенности содержания тяжелых металлов в урбаногемах Северо-Восточного административного округа города Москвы. *Агрехимический вестник*, издательство Ред. "Химия в сел. хоз-ве" (М.), **1**, 32-40
- Азовцева Н.А., Францев В.В. ««Магнитометр ВОЛНА-2» для измерения геомагнитного поля Земли над поверхностью и в толще почвы с привязкой к географическим координатам и времени UTC» регистрационный номер № 2021666155/69, 2021 г. 43.
- Азовцева Н.А., Францев В.В. Программа для магнитометра ВОЛНА-2 (SOFT) #2022611909, 4 февраля, 2022.
- Бахматова К.А., Матинян Н.Н., Шешукова А.А. (2022) Антропогенные почвы городских парков (обзор). *Почвоведение*, **1**, 77-95.
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
- Гладышева М.А. Магнитная восприимчивость урбанизированных почв (на примере города Москвы). Автореферат к.б.н. 2007.
- Горбунов Н.И., Абрукова Л.П. (1974) Реологические свойства и минералогический состав слитых почв. *Почвоведение*, **8**, 74–85.
- Гросс Е.Е., Кокорева А.А., Кулижский С.П., Николаева Е.И., Соловьева Т.П. (2013) Исследование изменения прочности агрегатов почв при различных сельскохозяйственных нагрузках. *Вестник Томского государственного университета*. **368**, 180–185.
- Дриц В.А., Сахаров Б.А. (1976) Рентгеноструктурный анализ смешанослойных минералов. М.: Наука, 256 с.



- Закон города Москвы от 29 апреля 2015 года N 19; в редакции, введенной в действие с 27 июня 2022 года Законом города Москвы от 8 июня 2022 года N 17 Глава 4. Управление в области охраны и рационального использования городских почв Статья 10. Мониторинг городских почв.
- Иванов А.В. Магнитное и валентное состояние железа в твёрдой фазе почв. Автореф. Дисс....докт. биол.н. М., 2003, 397 с.
- Карпачевский Л.О. (2009) Структура почв и современные подходы к её изучению. Рецензия. *Почвоведение*, **12**, 1525-1527.
- Медведев В.В. Структура почвы. Харьков, 2008. 406 с.
- Орлов Д.С. Химия почв / Д.С. Орлов, Л.К. Садовникова, Н.И. Суханова. – М.: Высш. шк., 2005. – 558 с.
- Почвенная карта Москвы. [Электронный ресурс] / – Электрон. текстовые дан. – Москва – Режим доступа: http://www.etomesto.ru/map-eco_pochva/, свободный.
- Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А. (2011) Систематика почв и почвообразующих пород города Москвы и возможность включения их в общую классификацию. *Почвоведение*, **5**, 611- 623.
- Смагин А.В., Азовцева Н.А., Смагина М.В., Степанов А.Л., Мягкова А.Д., Курбатова А.С. (2006) Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий. *Почвоведение*. **5**. 603–615.
- Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2012. 544.
- Состояние почвенного покрова города Москвы. [Электронный ресурс] / – Электрон. текстовые дан. – Москва – Режим доступа: http://www.dpioos.ru/eco/ru/condition_soil, свободный.
- Строганова М.Н., Агаркова М.Г., Мягкова А.Д. Почвы города Москвы: тревоги и надежды // Почва, город, экология. М., 1997, с. 181-265.
- Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 614 с.
- Умарова А.Б., Бутылкина М.А., Сусленкова М.М., Александрова М.С., Ежелев З.С., Хмелева М.В., Шхапацев А.К., Гасина А.И. (2021) Агрегатная структура естественных и пахотных почв разного генезиса: морфологические и реологические характеристики. *Почвоведение*, **9**, 1019-1032.
- Ширкин Л.А, Трифонова Т.А., Кошман В.А, Краснощёков А.Н. (2012) Оценка техногенной трансформации почвенного покрова с применением анализа магнитной восприимчивости почв. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, **14**, **5** (3), 866-871.
- Azotseva N.A, Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Kirichenko A.V. and Lasareva E.V. (2020) Physical-chemical predictors of soil pollution in the megapolis. *Journal of Physics: Conference Series*. **1592**, no. 012010, 012010.
- Azotseva N.A., Smagin A.V., Lazareva E.V. (2004) The effect of chitosan on copper mobility in soddy-podzolic soils and porous media. *Eurasian Soil Science*, Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), **37**, **4**, 402-408.
- IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 181.
- Khaidapova D.D., Klyueva V.V., Skvortsova E.B., Abrosimov K.N. (2018) Rheological Properties and Tomographically Determined Pore Space of Undisturbed Samples of Typical Chernozems



- and Soddy-Podzolic Soils. *Eurasian Soil Science*, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), **51, 10**, 1191-1199.
- Parfenova A.M., Lasareva E.V., Azovtseva N.A. (2021) Nanomagnetite and chitosan affect seed germination and growth of wheat (*Triticum Aestivum* L) *Letters in Applied NanoBioScience, București* (Romania), **10, 2**, 2279-2288 DOI
- Shariatmadari, N., Reza, M. (2020) Terimental study on the effect of chitosan biopolymer on sandy soil stabilization. *E3S Web of Conferences E-UNSAT 2020*, **195**, 06007.
- Vlasov D.V., Kukushkina O.V., Kosheleva N.E., Kasimov N.S. (2022) Levels and Factors of the Accumulation of Metals and Metalloids in Roadside Soils, Road Dust, and Their PM10 Fraction in the Western Okrug of Moscow. *Eurasian Soil Science* **55 (5)** Maik Nauka/Interperiodica Publishing Russian Federation 556-572 DOI: 10.1134/S1064229322050118.
- Yudina Anna V., Kuzyakov Yakov (2023) Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. *Geoderma*. **434**, 116478 doi.org/10.1016/j.



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННЫХ СЛОЕВ НА РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ

Алимов А. Л.¹, Вышкварко А. А.¹, Снегирев В. В.², Ежелев З. С.³, Кокорева А. А.³

¹АО «Минимакс-94», Москва, Российская Федерация
www.mm94.ru, alimoval@mm94.ru

²Физический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация

³Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

MODERN TECHNOLOGIES FOR CONTINUOUS MONITORING OF TEMPERATURE AND MOISTURE CONTENT OF SOIL LAYERS AT VARIOUS DEPTHS

Alimov A. L.¹, Vyshkvarko A. A.¹, Snegirev V. V.², Ezhelev Z. S.³, Kokoreva A. A.³

¹ Minimax-94 JSC, Moscow, Russian Federation
www.mm94.ru, alimoval@mm94.ru

²Physics faculty of Moscow State University, Moscow, Russian Federation

³Soil Science Faculty of Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: Article describes the working principle of newly developed soil profile temperature and moisture sensor, with results of outdoor testing with correlation to external weather sensors and laboratory testing comparing sensors moisture readings with gravimetric measurement results.

Введение

При исследовании характеристик различных почв важное значение имеет распределение по глубине температуре и влажности. Современные измерительные системы могут обеспечить не только высокую точность, но и длительный, в течении нескольких лет, непрерывный процесс измерения параметров почв, тем самым обеспечивая исследователя большим объемом экспериментальных данных, которые принципиально не могут быть получены традиционными "ручными" или полуавтоматическими методами.

Объекты и методы

Традиционно распределение температуры и влажности по глубине в почвах измеряется датчикам Delta-T (Великобритания), Sentek (Австралия) и некоторыми другими, менее известными производителями. В последнее время в РФ возник спрос на аналогичную измерительную аппаратуру российского производства. Поэтому российской фирмой Минимакс-94 был разработан датчик ДВГ-01, позволяющий измерять температуру и влажность грунта на глубине до 1,2 м с шагом 0,1 м. Диаметр датчика 30 мм, датчик имеет цифровой интерфейс RS-485 и потребляет в режиме ожидания менее 0,1 Вт. Может иметь от 3 до 12 измерительных секций.

Температура измеряется точно в центре измерительной секции, влажность определяется путем измерения диэлектрической проницаемости грунта в слое мощности 3-4 см и эффективном объеме около 500 см³. Так как диэлектрическая проницаемость воды, приблизительно равная 80 существенно превышает диэлектрическую проницаемость твердых составляющих почвы и воздуха в порах, то измеренная датчиком диэлектрическая

проницаемость окружающей дисперсной среды, т.е. почвы, пересчитывается в объемное содержание влаги через известные соотношения с использованием экспериментально полученных на образцах почвы калибровочных значений.

Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследований с использованием датчика ДВГ-01 с 6-ю измерительными секциями были выбраны почвы лизиметрических площадок факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова. На площадке были также установлены датчики температуры и влажности воздуха и датчик атмосферных осадков также производства Минимакс-94. Автоматический сбор и накопление данных осуществлялся облачным программным комплексом Минимакс-94 Clever Farmer.

На рис. 1 представлены графики зависимости температуры почвы на различных глубинах 5, 15, 25, 35, 45 и 55 см. в период с 15 апреля 2024 по 15 мая 2024 г. Хорошо видны значительные суточные колебания температура в приповерхностном слое и сильно сглаженный температурный профиль на глубине 55 см. Изменение влажности почвы во времени также наиболее выражено в приповерхностном слое, но суточные колебания выражены слабо, при этом существенные колебания влажности происходят при выпадении жидких осадков и в течение 1-2 суток после их окончания.

На рис. 2 представлены данные с датчика температуры воздуха (верхний график) и данные по температуре почвы с датчика ДВГ-01 (нижний график) за период с 7 мая по 10 мая 2023 г. Можно наблюдать практически прямую зависимость температуры почвы на малой глубине от температуры окружающего воздуха, и уменьшение суточных колебаний температуры почвы с глубиной измерения, а также инверсию температуры в соседних приповерхностных слоях почвы в разное время суток, что позволяет определять направление и интенсивность теплопереноса в почве.

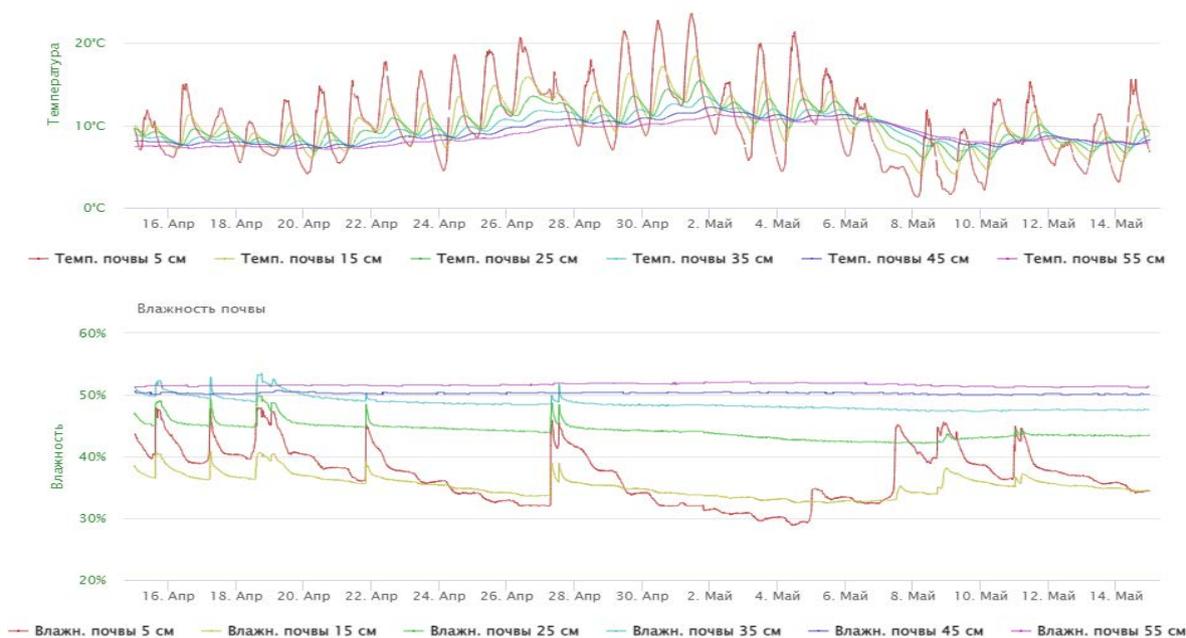


Рис.1 Температура и влажность почвы, полученные с датчика ДВГ-01 за месяц.

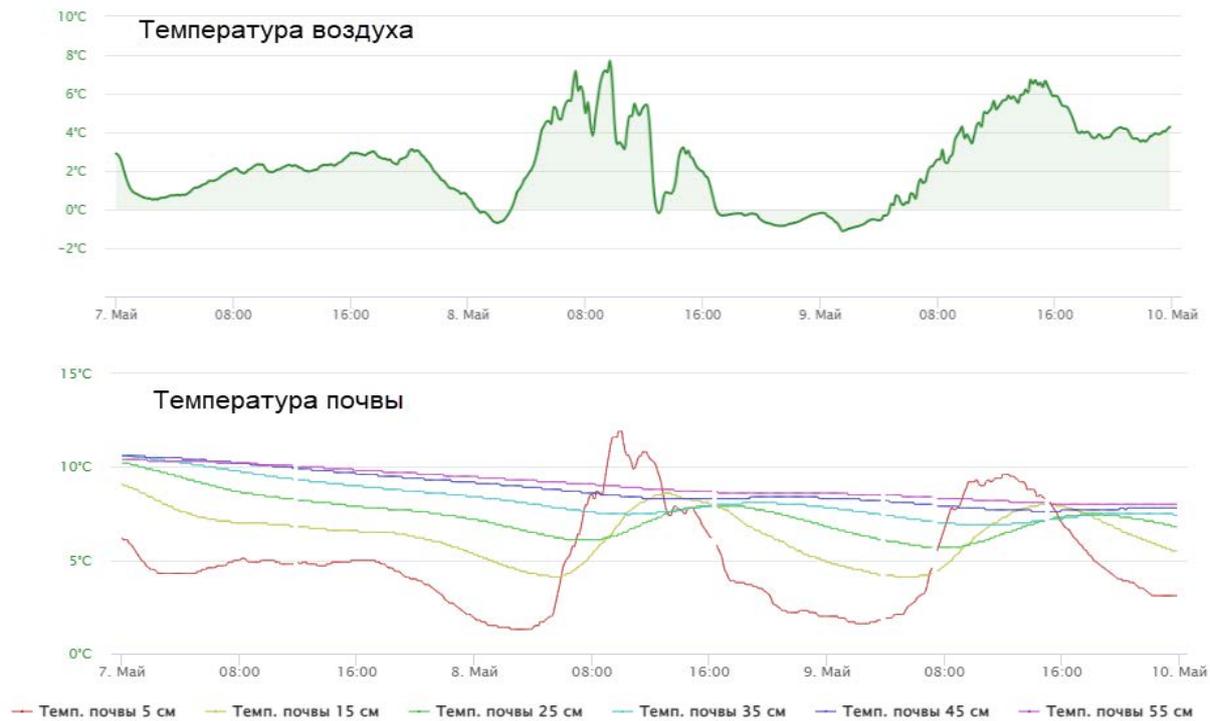


Рис.2 Сравнительная динамика изменения температуры воздуха и температуры почвы на разных глубинах.

На рис. 3 представлены данные с датчика осадков (верхний график) и данные по влажности почвы с датчика ДВГ-01 за период с 14 апреля по 16 апреля 2024 г. (нижний график). На верхнем графике голубыми вертикальными линиями отображены осадки в виде дождя. Из зависимостей хорошо видна реакция датчика на изменение влажности почвы в приповерхностном слое и динамика проникновения влаги в более глубокие слои почвы.



Рис.3 Сравнительная динамика количества жидких осадков и изменения влажности почвы на разных глубинах.



Для проведения лабораторных испытаний был специально изготовлен укороченный датчик ДВГ с одной измерительной секцией.

В качестве образца использован песок с плотностью 1,62 г/см³. Сравнение проводилось с влагомером Takeme-10 производства КНР, а также с влажностью, определенной весовым методом.

Использовано 4 заданных влажности песчаного образца: от воздушно-сухого образца, до полной влагоемкости. Результаты представлены в Таблице 1.

Как видно из таблицы 1 наблюдается хорошее согласие результатов, полученных датчиком влажности ДВГ-01 и результатов, полученных другими методами в том числе и прямым весовым методом

Таблица 1. Результаты различных методов измерения объемной влажности образца

Влажность, см ³ /см ³	ДВГ-01, см ³ /см ³	Takeme-10, см ³ /см ³	Термостатно-весовая влажность, см ³ /см ³
Воздушно/сухой образец	3,1	3,5	3,6
0,7*НВ	21,3	22,6	26,0
НВ	28,9	29,2	31,2
Полная влагоемкость	31,4	31,5	32,4

Выводы

Результаты проверки характеристик на открытом грунте и в лаборатории показали хорошие результаты.

Есть возможность дальнейшего развития конструкции и программного обеспечения датчика, по результатам опытной эксплуатации и отзывов от потребителей и исследователей.

Экспериментальная работа по выяснению особенностей установки датчика в разные типы почв и грунтов и точности измерения их параметров продолжается.

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам кафедры физики и мелиорации почв факультета Почвоведения МГУ проф., д.б.н. Архангельской Т.А. и проф., д.б.н. Умаровой А.Б. за постоянное внимание и помощь в проведении работ.



УДК 54.027:546.79:631.41/432:633.166

**ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА ПОДВИЖНОСТЬ И НАКОПЛЕНИЕ
137CS РАСТЕНИЯМИ**

Анисимов В.С.* , Фесенко С.В., Анисимова Л.Н., Санжаров А.И., Мезина М.В., Коровин С.В.,
Крыленкин Д.В., Корнеев Ю.Н., Новикова Н.В.

Всероссийский НИИ радиологии и агроэкологии НИЦ “Курчатовский институт”, Киевское ш., 1,
корп. 1, Обнинск, 249035 Россия

*e-mail: vsanisimov@list.ru

INFLUENCE OF SOIL HUMIDITY ON THE MOBILITY AND ACCUMULATION OF 137Cs BY PLANTS

Anisimov V.S.* , Fesenko S.V., Anisimova L.N., Sanzharov A.I., Mezina M.V., Korovin S.V., Krylenkin D.V.,
Korneev Yu. N., Novikova N.V.

All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Kurchatov Institute, Kievskoe sh., 1, building 1,
Obninsk, 249035 Russia

*e-mail: vsanisimov@list.ru

Annotation: One of the urgent tasks of radioecology is to study the role of soil moisture in the root uptake of radionuclides and heavy metals. In this work, using the example of radionuclide 137Cs under controlled conditions of the vegetation experiment, it is shown that with an increase in the average daily soil moisture in vegetation vessels from 6.7 to 13.3% by weight (or from 25 to 49% FWC - Full Water Capacity), the concentration of the radionuclide in soil solution significantly decreases, while its content in the exchange form remains practically unchanged. The consequence of a decrease in the concentration of radionuclide in the soil solution is a 2-fold decrease in the accumulation coefficients of 137Cs by the aboveground parts of the test plants.

Key words: radionuclide, mass activity concentration, volume activity concentration, exchange form, soil solution, barley, concentration ratio

Введение

Несмотря на то, что с момента подписания в 1963 году Московского договора о запрещении испытания ядерного оружия в трех сферах: в атмосфере, под водой и в космическом пространстве, положившего конец глобальным выпадениям 137Cs, прошло более 60-ти лет, а также прошествии почти 40 лет с момента крупнейшей в истории человечества аварии на Чернобыльской АЭС, в результате которой было выброшено в атмосферу и поступило на поверхность Земли 74-86 ПБк 137Cs [4], актуальность изучения поведения этого опасного техногенного радионуклида в биогеоценозах остается по-прежнему высокой. В немалой степени это связано с риском различных техногенных аварий в области обращения с радиоактивными материалами, ядерным терроризмом и неразрешимыми противоречиями между государствами – членами ядерного клуба. До сих пор в области изучения поведения техногенных радионуклидов в компонентах экосистем остаются темные пятна, которые требуют прояснения. Одной из таких проблем является изучение роли влажности почвы в миграционной способности радионуклидов между компонентами экосистем. Целью настоящей работы является изучение влияния фактора влажности почвы на подвижность в ней радионуклида 137Cs и накопление его растениями.

Материалы и методы

Предметом исследований являлось выявление закономерностей, связывающих влажность почвы с подвижностью и биологической доступностью радионуклида 137Cs.



Объектом исследования являлись: яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта Зазерский-85 и дерново-подзолистая супесчаная окультуренная (ПД), отобранная из пахотного горизонта вблизи д. Передоль в Жуковском районе Калужской области.

Рабочий радиоактивный раствор ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.08$ лет) готовили из образцового раствора радионуклида ^{137}Cs производства ВО «ИЗОТОП». Общая активность приготовленного рабочего раствора составляла на момент начала эксперимента 285000 Бк. После внесения рабочего раствора ^{137}Cs в суспензию исследуемой почвы (m сухой почвы = 15 кг) при тщательном перемешивании почва высушивалась до воздушно-сухого состояния, повторно увлажнялась до состояния суспензии средней густоты, тщательно перемешивалась и высушивалась до состояния «физической спелости». Далее почву просеивали через сито с отверстиями 3 мм и переносили в вегетационные сосуды. В итоге каждый сосуд содержал 1 кг почвы (в пересчете на абсолютно-сухую массу) с удельной активностью по ^{137}Cs 19000 ± 300 Бк/кг.

Спустя 1 месяц после внесения ^{137}Cs в исследуемую почву (инкубация) в вегетационные сосуды высаживали 3-х дневные проростки ячменя в количестве 18 шт./сосуд. Растения выращивали в климатической камере при $H_{\text{возд.}} = 50 \pm 10\%$, $t = 27 \pm 3$ °С. Влажность почвы в сосудах контролировали по весу, ежедневно доливая дистиллированную воду в сосуды до значений, соответствующих $W=35, 42, 49, 57$ и 65% ПВ (всего 5 вариантов по 3 сосуда в каждом), (рис. 1).

Затем растения срезали (на высоте 1 см от почвы), снимали морфометрические показатели (среднюю высоту, сырую и сухую массу 1 растения) и определяли в них удельную активность ^{137}Cs (A_m ^{137}Cs) с помощью спектрометра Гамма-1П с полупроводниковым детектором из особо чистого германия с относительной эффективностью регистрации 35%. Почву в вегетационных сосудах после уборки растений доводили водой до контролируемой массы, накрывали крышками и оставляли на сутки в климатической камере для уравнивания. Далее отбирали влажную почву в центрифужные пробирки из тефлона со вставками, имеющими перфорированное дно [8] и отжимали центрифужные почвенные растворы (ЦПР) при 4000g в течение 45 минут. В полученных ЦПР определяли объемную активность ^{137}Cs (A_v ^{137}Cs). Из оставшейся после центрифугирования частично обезвоженной почвы отбирали навески для определения влажности и содержания обменной формы радионуклида (4-кратная последовательная экстракция 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (рН 4.8) центрифугированием до отрицательной реакции на Ca^{2+} после предварительного встряхивания в течение 1 часа ($t:j=1:5$)).

Физические и химические показатели почв определяли общепринятыми методами [1,3,6]: рНКС1 (рНН₂O – потенциметрическим, в суспензии почвы в 1 М растворе КС1 (дистиллированной воде) при соотношении твердой и жидкой фаз ($t:j$) 1: 2.5, гранулометрический состав почв – пипеточным методом Н.А. Качинского, содержание органического углерода – по методу Тюрина, гидролитическую кислотность – по Каппену, сумму поглощенных оснований – по Каппену–Гильковицу, содержание подвижных форм P_{205} – по Кирсанову в модификации ЦИНАО (0.2 М HCl , $t:j = 1:5$). И по Чирикову – в черноземе типичном. Обменные формы калия, кальция и магния извлекали из почв с помощью 1 М NH_4Cl (рН 6.5) [3], $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (рН 7.0) – ацетатно-аммонийного буферного раствора (ААБ-7.0) [1], а также с помощью 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (рН 4.8) – ацетатно-аммонийного буферного раствора (ААБ-4.8), до отрицательной реакции на ионы Ca^{2+} [2,5].

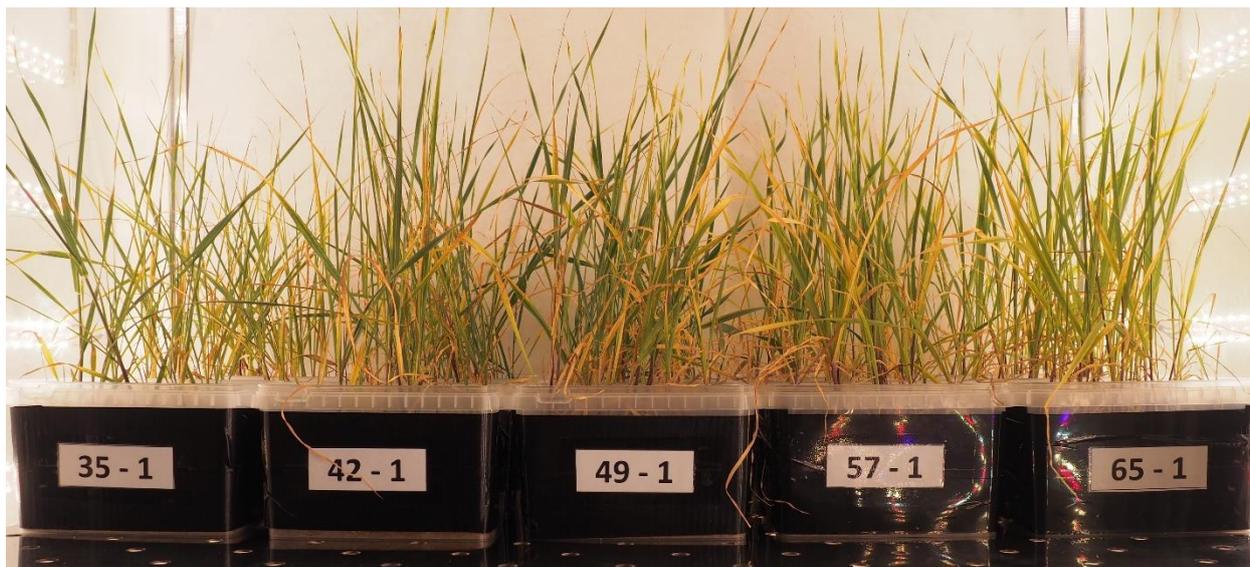


Рис. 1. Варианты вегетационного опыта по изучению влияния влажности почвы на подвижность и доступность растениям радионуклида ^{137}Cs

Fig. 1. Variants of the vegetation experiment to study the effect of soil moisture on the mobility and accessibility of ^{137}Cs radionuclide to plants

Гранулометрический состав почв определяли седиментационным методом на приборе марки SediGraph III 5120 (Particle Size Analysis System). Предварительно образец подвергался диспергированию ультразвуковым диспергатором мощностью 120 Вт в 50 мл диспергирующей жидкости (1%-ном растворе пиррофосфата натрия $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) в течение 10 мин. Минералогический состав исследуемой почвы изучался с помощью метода рентген-дифрактометрии для образцов почв, насыщенных Co и Zn . Анализ выполняли методом рентген-дифрактометрии [7] на приборе ДРОН-3*¹.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты определения показателей, характеризующих физико-химические свойства исследованных почв, а также обобщенные данные по массовым долям отдельных механических фракций приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики исследуемой почвы

Показатель	Дерново-подзолистая супесчаная почва
pH_{KCl}	5.05 ± 0.01
$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	6.04 ± 0.01
Органический углерод, %	1.0 ± 0.01
$\text{H}_\text{г}$, смоль(+)/кг почвы	1.89 ± 0.02
Массовая доля фракции <0.01 мм в почве, %	18.39
Сумма обменных оснований, смоль(+)/кг почвы	5.3 ± 0.1
Обменный K_2O , мг/кг (по Масловой)	41.2 ± 2.6
Подвижный P_2O_5 , мг/кг (по Кирсанову)	127 ± 2

¹ Минералогический анализ выполнялся на кафедре химии почв МГУ им. М.В. Ломоносова Т.А. Соколовой и Е.И. Толпештой в 2010-г.



Содержание обменных катионов, смоль(+)/кг почвы, извлекаемых:	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
1 М NH ₄ Cl (pH 6.5)	5.70 ± 0.68	0.53 ± 0.05	0.19 ± 0.02
1 М CH ₃ COONH ₄ (pH 7.0)	5.21 ± 0.08	0.47 ± 0.10	0.17 ± 0.01
1 М CH ₃ COONH ₄ (pH 4.8)	5.20 ± 0.06	0.40 ± 0.09	0.15 ± 0.01
Массовая доля фракции (мм) в почве, %			
1-0.25		20.86±0.01	
0.25-0.05		20.60±0.31	
0.05-0.01		34.56±0.31	
0.01-0.005		5.88±0.32	
0.005-0.001		6.5±0.6	
<0.001		11.61±1.21	
Физическая глина (<0.01 мм) %		23.98±0.4	
Физический песок %		76.02±0.4	

Химические свойства почвы

Исследуемая дерново-подзолистая почва может быть охарактеризована как среднегумусная, слабокислая, с повышенным содержанием подвижного фосфора и низким содержанием обменного калия.

Гранулометрический состав почвы, или ее текстура, это уровень «базовой структуры», так как на этом уровне формируются основные, базовые свойства почвы. От того в какой степени в почве представлены крупные или мелкие частицы, будут зависеть все фундаментальные свойства, ее поведение в отношении поглощения и проведения веществ и энергии, их трансформация, т.е. все основные процессы, которые определяют облик, свойства, внутреннюю жизнь почвы и ее функции в биосфере. Гранулометрический состав является важной генетической и агрономической характеристикой. Исследуемая почва по гранулометрическому составу может быть классифицирована как легкосуглинистая крупнопылевато-песчаная.

Минералогический состав исследуемых почв

Преобладающими компонентами являются каолинит в сумме с хлоритом (60-62%) при преобладании каолинита, почвенный хлорит и смешанослойные минералы с участием хлоритовых пакетов (количественно не определяются). На долю диоктаэдрического иллита приходится 31%, на долю лабильных минералов – 7-9%. Лабильные минералы представлены вермикулитом и лабильными пакетами в смешанослойных иллит-сметитовых минералов с тенденцией к упорядоченности. Присутствуют кварц и полевые шпаты.

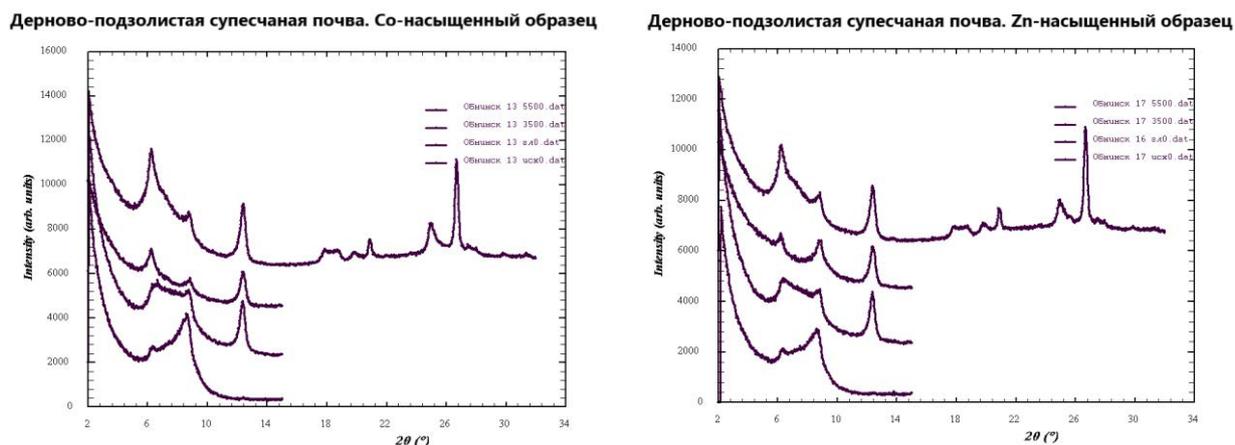


Рис. 2. Рентген-дифрактограммы образцов илистой фракции, извлеченной из дерново-подзолистой супесчаной почвы, подготовленных для минералогического анализа по методу Э.А. Корнблума
Fig. 2. X-ray diffractograms of samples of silty fraction extracted from sod-podzolic sandy loam soil prepared for mineralogical analysis using the method of E.A. Kornblum

Существенных различий в форме дифракционных спектров и в содержании отдельных групп глинистых минералов между образцами, насыщенными разными катионами (Co, Zn) не выявлено.

Средняя влажность почвы для 5-ти вариантов опыта в течение периода вегетации растений (26 сут.) составляла, соответственно, 6.7; 8.3; 9.6; 11.3 и 13.3 мас.%, или 25; 30; 35; 42 и 49 % ПВ (рис. 3а). При этом, необходимо отметить, что суточные флуктуации влажности почвы, обусловленные процессами эвапотранспирации были весьма значительными и достигали, соответственно, 6, 7, 9, 10 и 11 мас.%. На рис. 3б приведено корреляционное соотношение между влажностью почвы, выраженной в виде массовой доли влаги в почве W , мас.%) и влажностью, выраженной в виде доли от полной влагоемкости почвы (W , % ПВ)

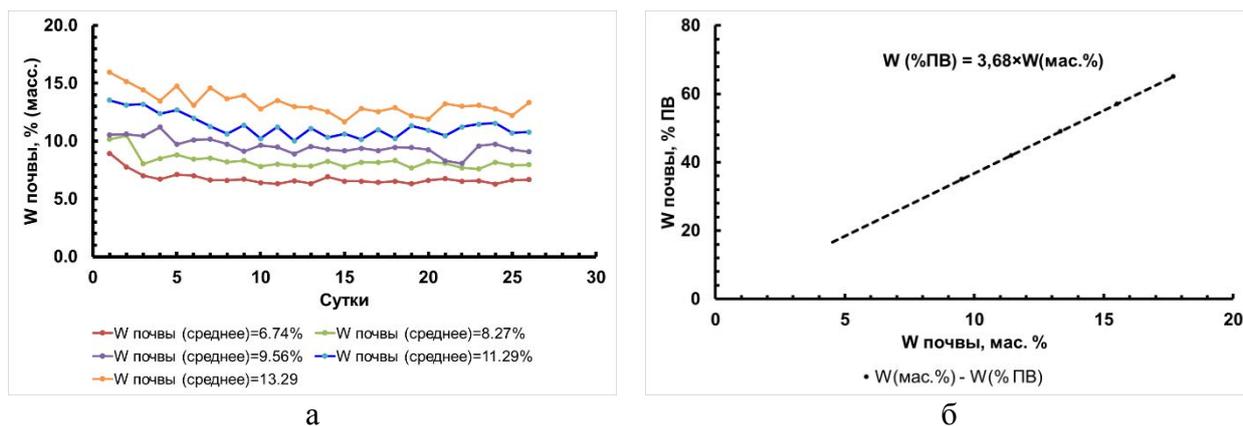


Рисунок 3. Изменение средней влажности почвы для различных вариантов, мас. % (а); зависимость между влажностью почвы, выраженной в виде массовой доли влаги в почве W , мас.%) и влажностью, выраженной в виде доли от полной влагоемкости почвы (W , % ПВ)

Figure 3. Change in average soil moisture for different variants, by weight. % (a); the relationship between soil moisture, expressed as the mass fraction of moisture in the soil W , wt.%) and moisture, expressed as a fraction of the Full Water Capacity of the soil (W , % FWC)

Растения, выращиваемые в более благоприятных по фактору влажности условиях, по морфометрическим показателям (средняя высота, биомасса в пересчете на одно растение) превосходили растения, выращиваемые в засушливых условиях (рис. 1). По высоте различия были незначительными и недостоверными, а по массе достигали полутора раз.

При отжимании при помощи центрифугирования из почв различных вариантов опыта почвенных растворов оказалось, что объемная активность (A_v) ^{137}Cs в них резко падает с 25 до 8 Бк/дм³ (в 4.5 раза!) с увеличением влажности почвы (рис. 4а). Соответственно, значения коэффициентов распределения радиоцезия между твердой и жидкой (почвенным раствором) фазами почвы: $K_d = A_m^{137}\text{Cs}(\text{почва})/A_v^{137}\text{Cs}(\text{почв. раствор})$, наоборот, увеличиваются с 800 до 2400 дм³/кг.

Однако, попытки выявить закономерности в изменении содержания в почвах с различной влажностью обменной формы ^{137}Cs не увенчались успехом. Оказалось, что вне зависимости от влажности почвы содержание обменной формы ^{137}Cs бессистемно варьирует в пределах 40-45% от общего содержания радионуклида в почве (рис. 4б). Таким образом, относительное содержание обменного ^{137}Cs в почве не зависит от ее влажности (если, конечно, не иссушать почву до воздушно-сухого состояния).

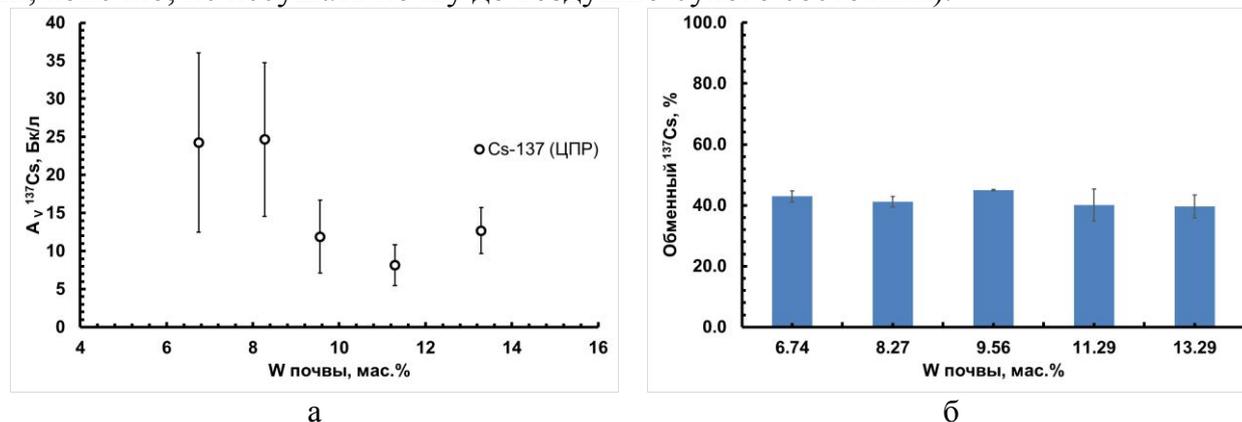


Рис. 4. Зависимость между объемной активностью ^{137}Cs в центрифужном почвенном растворе и средней влажностью почвы (мас.%), (а); содержанием обменной формы ^{137}Cs в почве (в %-х от общего количества радионуклида) и средней влажностью почвы (мас.%), (б)

Fig. 4. The relationship between the volume activity concentration of ^{137}Cs in a centrifuge soil solution and the average soil moisture (wt.%), (a); the content of the ^{137}Cs exchange form in the soil (in% of the total amount of radionuclide) and the average soil moisture (wt.%), (b)

В результате резкого снижения объемной активности ^{137}Cs в почвенном растворе, корневое поглощение его растениями ячменя также снижается, результатом чего является уменьшение удельной активности ^{137}Cs в надземных частях тест-растений ячменя: с 12200 до 6400 Бк/кг сухой вегетативной массы, т.е., в 2 раза (рис. 5а,б). Соответственно, величины коэффициентов накопления радионуклида надземными частями ячменя ($K_H = A_m^{137}\text{Cs}(\text{растение})/A_m^{137}\text{Cs}(\text{почва})$) уменьшаются с 0.63 до 0.33.

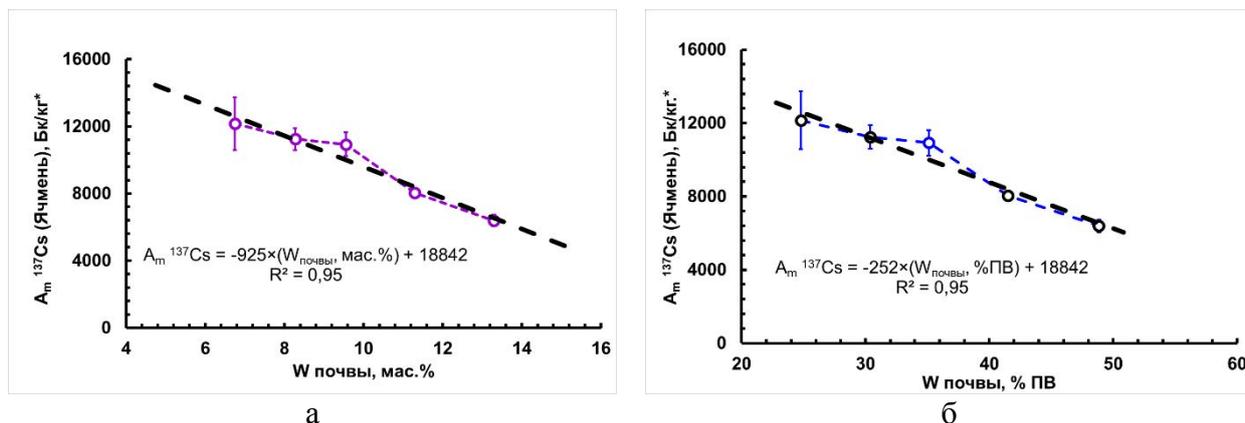


Рис. 5. Зависимость между содержанием удельной активностью ^{137}Cs в надземной биомассе ячменя и средней влажностью почвы, выраженной в мас.% (а) и %-х от ПВ (б) *в пересчете на сухую массу растений

Fig. 5. The relationship between the content of the mass activity concentration of ^{137}Cs in the aboveground biomass of barley and the average soil moisture, expressed in wt.% (a) and % of FWC (b)

*in terms of the dry mass of plants

В нашем опыте наглядно продемонстрирован эффект биологического разбавления радионуклида с ростом биомассы растений – когда из одинакового объема субстрата (почвы) с одинаковым количеством внесенного радионуклида вынос его с единицей сухой массы растений, выращенных на сухой и влажной почвах, различается в 2 раза. Аналогичный эффект наблюдается также и при применении нитратных удобрений при одинаковой влажности. Очевидно, связано это с тем, что скорость десорбции радионуклида из почвенного поглощающего комплекса в почвенный раствор ниже скорости поглощения его корнями растений для растений, выращиваемых в благоприятных условиях.

Выводы

1. Растения, выращиваемые в более благоприятных по фактору влажности условиях, по морфометрическим показателям (средняя высота, биомасса в пересчете на одно растение) превосходят растения, выращенные в засушливых условиях. По высоте различия незначительны и недостоверны, а по массе достигают полутора раз.

2. В центрифужных почвенных растворах, извлеченных из почв вариантов опыта с увеличивающейся влажностью объемная активность (A_v) ^{137}Cs в них резко падает с 25 до 8 Бк/дм³. Соответственно, значения коэффициентов распределения радиоцезия между твердой и жидкой (почвенным раствором) фазами почвы, наоборот, увеличиваются с 800 до 2400 дм³/кг.

3. Относительное содержание обменного ^{137}Cs в почве не зависит от ее влажности.

4. Результатом резкого снижения объемной активности ^{137}Cs в почвенном растворе является значительное уменьшение корневого поглощения радионуклида растениями ячменя, что проявляется в уменьшении удельной активности ^{137}Cs в надземных частях тест-растений ячменя: с 12200 до 6400 Бк/кг сухой вегетативной массы, т.е., в 2 раза. Соответственно, величины коэффициентов накопления радионуклида надземными частями ячменя ($K_H^{137\text{Cs}}$) также уменьшаются с 0.63 до 0.33.

Литература

Агрохимические методы исследования почв. – М.: Наука, 1975. – 656 с.



- Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Фригидова Л.М., Дикарев Д.В., Фригидов Р.А., Корнеев Ю.Н., Санжаров А.И., Арышева С.П. (2018) Оценка миграционной способности Zn в системе почва – растение. *Почвоведение*. **4**, 427-438
- Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв (изд.2-е, перераб. и доп.) изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.
- Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь) / Под ред. Израэля Ю.А., Богдевича И.М. М.–Минск: Фонд “Инфосфера” НИА-Природа. 2009. 140 с.
- Зырин Н.Г., Садовникова Л.К. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 208 с
- Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 689 с.
- Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах. Тула: Гриф и К. 2005. 336 с.
- Anisimov V.S., Sanzharov A.I., Korneev Yu.N., Anisimova L.N., Frigidov R.A., Kochetkov I.V., Frigidova L.M., Pimenov E.P. and Edomskaaya M.A. (2019) The influence of matrix pressure of the soil moisture on the acidity and cation composition of soil solutions extracted by different methods. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, **368**. DOI:10.1088/1755-1315/368/1/012003.



УДК: 631.434

СТРУКТУРНО-АГРЕГАТНЫЙ СОСТАВ ЧЕРНОЗЕМА СТОКОРЕГУЛИРУЮЩЕЙ ЛЕСОПОЛОСЫ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Безуглова О.С.^{1,2}, Гаевая Э.А.¹, Горбов С.Н.², Мищенко А.В.¹¹ Федеральный Ростовский аграрный научный центр, п. Рассвет, Россия² Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

e-mail: lola314@mail.ru

STRUCTURAL AND AGGREGATE COMPOSITION OF THE CHERNOZEM
OF RUNOFF-REGULATING FOREST STRIP IN THE ROSTOV REGIONO.S. Bezuglova^{1,2}, E.A. Gaevaya¹, S.N. Gorbov², A.V. Mishchenko¹¹ Federal Rostov Agricultural Research Centre, Rassvet village, Russian Federation² Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

e-mail: lola314@mail.ru

Annotation: Over a half-century period of observations in the chernozem under the runoff-regulating forest belt, a significant decrease in the boiling depth from 10% HCl was discovered, the A+B power did not change, the humus content increased to 5.43%. With a decrease in the diameter of structural aggregates, the humus content increases. The water-resistant properties of forest belt chernozem are characterized by a decrease in the amount of dust fraction by 41.1% compared to agrochernozems.

Введение

Значимость лесных полезащитных насаждений заключается в защите почвы от эрозии, улучшении водного, температурного режима, создании благоприятного микроклимата для возделывания сельскохозяйственных культур. Поля, защищённые лесными полосами, аккумулируют атмосферные осадки, которые теряются в виде стока талых и дождевых вод, стекающих с соседних полевых участков, и уменьшают испарение влаги, снижают скорость ветра при возникновении пыльных бурь. Когда говорят о защитной роли леса, в первую очередь имеют в виду его способность превращать поверхностный сток в глубинный, который идёт на пополнение грунтовых вод. Интенсивность этого процесса зависит от рельефа, толщины подстилки, состава насаждения и т.д. Поэтому значение стокорегулирующих лесных полос нельзя недооценивать, как элемент обустройства сельскохозяйственных агроландшафтов, имеющих как экологическую, так и продовольственную составляющую (Кравченко, 2009; Засоба и др., 2019).

Лесными массивами по всей России занято более 50% территории. Площадь земель в административных границах Ростовской области в 2005 году составляла 10096,7 тыс. га. Из этих земель 331,1 тыс. га (3,3%) составляли земли лесного фонда, что более чем в три раза меньше этого показателя для Южного федерального округа. К 2021 году в Ростовской области площадь земель лесного фонда увеличились до 4,1%, а площадь земель, занятых древесно-кустарниковой растительностью, практически не изменилась и составила 3,1% (Доклад..., 2022).

Влияние защитных лесных насаждений в условиях степной зоны Ростовской области трудно переоценить. Исследованиями по защите почв от эрозии в Ростовской области установлена эффективность следующего комплекса приемов и мероприятий: полосное размещение сельскохозяйственных культур + полезащитные лесные полосы, включающие элементы простейших гидротехнических сооружений – валов-канал (Маштаков, Автономов, 2018; Полуэктов, 2020). Стокорегулирующие лесные полосы положительно



вливают на свойства чернозема обыкновенного карбонатного: увеличивается мощность гумусового горизонта, опускается горизонт карбонатов и улучшается структура почвы (Засоба, 2017). Накопившийся листовый опад, имеющий высоту 7–9 см, является исходным материалом для образования гумуса. За счёт увеличения гумусированности почва приобретает повышенную противэрозионную стойкость в результате усиления механической и водной прочности агрегатов (Трофимов и др., 2014).

Снежный покров, накапливающейся в течение зимы на поверхности почвы, создает запас влаги. В период весеннего снеготаяния происходят основные потери атмосферных осадков. В результате обильного таяния снега наблюдаются эрозионные процессы, которые обусловлены многими причинами, в том числе и степенью промерзания почвы. В период снеготаяния запас воды в снеге составляет 225,4–338,7 т/га, и основная задача стокорегулирующих лесных полос перевести поверхностный сток во внутрпочвенный (Кравченко, 2009).

Объекты и методы исследований

Исследования были проведены в 2021–2023 гг. в длительном опыте, расположенном в Аксайском районе, входящим в Приазовскую сельскохозяйственную зону Ростовской области. Опыт зарегистрирован в Российской Географической сети длительных опытов с удобрениями (аттестат № 169). Участок окружен балками «Большой Лог», «Ореховая» и «Безымянная». Крутизна склонов юго-западной и северо-западной экспозиции колеблется в пределах 10–12°. Склон восточной экспозиции, на котором располагается опытный участок, более пологий: уклоны составляют 2,5–4°. Вокруг балки «Ореховая» расположены лесные насаждения и защитные 4-х и 6-рядные лесные полосы. В 1976 г. вокруг опытного поля была высажена Робиния ложноакациевая (*Robinia pseudoacacia*), в том числе в виде стокорегулирующей лесной полосы на водоразделе. Конструкция лесных полос, как правило, ажурная, но встречаются и участки, где нижний ярус занят кустарниковой растительностью. Почвы склонов слабо-, средне- и сильносмытые – в зависимости от крутизны склона и удаленности участка от водораздела, представлены черноземом миграционно-сегрегационным (обыкновенным карбонатным) на лёссовидном суглинке (согласно международной классификации WRB – Calcic Chernozem (Pachic Loamic)) (IUSS Working Group WRB, 2022).

Были выполнены следующие анализы: агрегатный состав методом сухого просеивания по Н.И. Савинову, определение содержания гумуса по Тюрину (ГОСТ 26213-91).

Обсуждение результатов

На стационаре в 2023 году были заложены почвенные разрезы в виде катены, которые представляли незэродированную почву (плато водораздела на южной опушке лесополосы) и склоны с почвами слабой и средней эродированности – агрочерноземы. Полевое определение почвы водораздела: чернозем миграционно-сегрегационный (обыкновенный карбонатный) мощный малогумусный тяжелосуглинистый на лёссовидной легкой глине. Почва на водоразделе была взята за контроль и с ней проводили сравнения агрочерноземов.

Глубина разреза №1 – 150 см. Вскипание слабое с 60 см, бурное – с 70 см, карбонатный мицелий с 65, белоглазка единично со 100 см, обильная – со 120 см.

Ad – 0–15 см. Сухой, темно-серый, зернисто-комковато порошистый, тяжелосуглинистый, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, густокорешковат, переход заметный по плотности.



A1 – 15–55 см. Свежий, темно-серый, комковато-порошисто-зернистый, тяжелосуглинистый. Уплотнен, тонкопористый, тонкотрещиноватый. Крупные корни, бусы, копролиты. Переход постепенный.

B1 – 55–70 см. Свежий, темно-серый с бурым оттенком, зернисто-комковато-ореховатый, тяжелосуглинистый. Уплотнен, тонкопористый, тонкотрещиноватый. Кротовина, крупные корни, земляные бусы. Переход заметный по окраске и вскипанию

B2 – 70–80 см. Свежий, неоднородный по окраске: серовато-бурый с темными затеками гумуса, комковато-ореховатый, легкоглинистый, уплотненный, тонкопористый, тонкотрещиноватый, карбонатная плесень, корешки и корни, копролиты.

BC – 80–110 см. Свежий, неоднородный по окраске: бурый с затеками гумуса и белесыми пятнами единичной белоглазки, порошисто-комковато-ореховатый, легкоглинистый, плотный, переход заметный по обилию белоглазки.

Ск – 110–150/ дно. Карбонатная лессовидная легкая глина.

По данным Е.В. Полуэктова в 1973 году до закладки лесополосы на водоразделе также были заложены почвенные разрезы, описание реперного (эталонного) разреза приведено в монографии, посвященной свойствам эродированных почв Ростовской области [7, с. 12]. В 1976 году была высажена лесополоса, с её северной стороны было заложено гидротехническое сооружение «вал-канава». Наш разрез был заложен на южной опушке лесополосы, но под сенью деревьев – от крайнего ряда деревьев на расстоянии 2-х метров. Таким образом возраст лесополосы на момент наших исследований составлял 47 лет, и ее влияние на прилегающую старозалежную полосу почвы было несомненным. То, что почва из пахотного состояния перешла в старозалежное, доказывало наличие мощной дернины (15 см) и отсутствие визуальных следов некогда существовавшего пахотного слоя. При сопоставлении этих двух описаний обнаружено значительное понижение линии вскипания: если в 1973 году почва вскипала с поверхности, то в 2023 году слабое вскипание было отмечено на глубине 60 см, бурное – с 70 см. Глубина появления карбонатного мицелия (65 см) оказалась несколько выше, чем в описании, приведенном Е.В. Полуэктовым (76 см), зато граница появления белоглазки и ее характер (мелкая, многочисленная, конкреционная) совпали. В то же время содержание гумуса выросло с 4,83% (данные Е.В. Полуэктова) до 5,43%. Такие результаты хорошо согласуются с ранее установленными последствиями влияния лесной растительности на свойства черноземов в степной зоне (Горбов, Безуголова, 2014; Скрипников, 2023). И с нашей точки зрения обусловлены влиянием гидротехнического сооружения вал-канавы и самой лесополосы на водно-воздушный режим почвы, способствующих переводу поверхностного стока во внутрипочвенный, уменьшению испарения влаги с поверхности почвы, оптимизации условий гумусообразования.

Другие разрезы были заложены на пахотных почвах – агрочерноземах. Полевое определение почвы: агрочернозем миграционно-сегрегационный (обыкновенный карбонатный) слабосмытый среднemosный малогумусный тяжелосуглинистый на лессовидном суглинке. Приводим для примера описание разреза 2.

Глубина разреза 130 см. Вскипание слабое с 20 см, бурное – с 30 см, прожилки карбонатов с 60, белоглазка мелкая, рыхлая, единично со 110 см.

Апах – 0–30 см. Сухой, темно-серый, пылевато-порошисто-глыбистый, тяжелосуглинистый, рыхлый, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корешковат, переход заметный по плотности.

Аподпах – 30–40 см. Свежий, темно-серый с буроватым оттенком в нижней части, зернисто-порошисто-комковатый, тяжелосуглинистый. Уплотнен, тонкопористый, тонкотрещиноватый. Переход заметный.

B1 – 40–60 см. Свежий, буровато-серый, порошисто-зернисто-ореховатый, тяжелосуглинистый Уплотнен, тонкопористый, тонкотрещиноватый. Кротовина, червороины, копролиты, мелкие корни. Переход постепенный.

B2 – 60–75 см. Свежий, неоднородный по окраске: темно-бурый с более светлыми и сероватыми пятнами, порошисто-ореховатый, тяжелосуглинистый, уплотненный, тонкопористый, тонкотрещиноватый, карбонатные прожилки, корешки, переход постепенный.

BC – 75–100 см. Свежий, неоднородный по окраске: с преобладанием темно-бурых и бурых тонов, порошисто-ореховатый, тяжелосуглинистый, плотный, переход постепенный.

Ск – 110–130/ дно. Карбонатный лессовидный тяжелый суглинок с обильными прожилками карбонатов и единичной белоглазкой.

За длительный срок сельскохозяйственного использования глубина гумусового горизонта сократилась в слабосмытом черноземе на 15 см. В то же время в проведенных ранее исследованиях отмечено снижение содержания гумуса и макроэлементов по сравнению с исходным содержанием (Гаева и др., 2022).

В результате просеивания почвы на воздухе на водоразделе было выявлено, что количество агрегатов крупно глыбистой фракции размером >10 мм (5,8%) и пыли $<0,25$ мм (5,2%) практически одинаково. В почвах агрочерноземов количество этих же фракций в 2–3 раза больше, при одновременном уменьшении мезоагрегатов. На старопахотных землях систематическая механическая обработка почвы приводит к количественному уменьшению мезоагрегатов агрегатов размером от 5–0,25 мм на 4,6–51,0% по сравнению с почвенными агрегатами чернозема на водоразделе, где обработки не проводились с момента закладки лесной полосы. Наибольшее процентное содержание агрегатов в почве на водоразделе отмечено во фракциях размером 3–5, 2–3 и 1–2 мм (12,3–21,2%), что является показателем хорошей оструктуренности (рис. 1а).

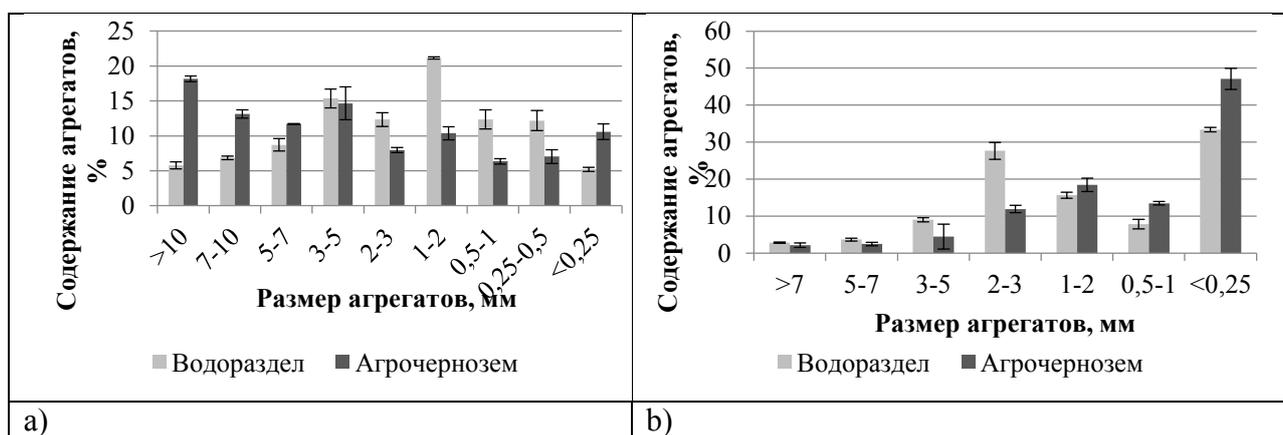


Рис. 1. Динамика структурно-агрегатного состава почвы (а) и содержания водоустойчивых агрегатов (б) в слое почвы 0–30 см, %

Анализ количества водоустойчивых агрегатов почвы на водоразделе выявил, что при минимальном содержании крупно глыбистых агрегатов размером >7 и 5–7 мм (2,8–3,7%), увеличивается количество пылевидных частиц ($<0,25$ мм) до 33,4%. Почвы агрочерноземов менее оструктурены. Количество крупноглыбистых агрегатов >7 мм (2,1%) и мезоагрегатов размером от 7 мм до 0,5 мм изменяется в пределах от 2,5 до 18,5%, при одновременном увеличении пылевидной фракции до 47,1%. Обращает на себя внимание тот факт, что

количество агрегатов размером 2–3 мм и 1–2 мм имеет наибольшую долю среди всех агрономически ценных фракций (11,9–27,7% и 15,6–18,5% соответственно) (рисунок 1b).

При возникновении стока воды и смыва почвы часть почвы перемещается вниз по склону, образуя у его подножия кольматационные наносы, в полевых условиях диагностированные как дерново-сильнонамытая почва. Для определения состава этой почвы был также проведен структурно-агрегатный анализ, с целью выявления изменений свойств чернозема обыкновенного в результате действия стока воды и смыва. В результате просеивания почвы кольматационных наносов на воздухе, был выявлен сдвиг доли агрегатов в сторону более мелких фракций. Очевидно, потоки воды частично разрушают макроагрегаты и сносят вниз по склону более мелкие частицы почвы.

В наносах крупно глыбистые агрегаты практически отсутствовали (0,2%). Мезоагрегаты размером от 7–10 до 2–3 мм составляли незначительную долю – 0,5–7,0%, которая увеличивалась с уменьшением размера фракций. Фракция диаметром 1–2 мм составляла 23,1%. Также отмечен количественный сдвиг в сторону образования агрегатов более мелких фракций размером: 0,5–1 мм – 17,1%, 0,25–0,5 мм – 30,2%, <0,25 мм – 17,1% (рисунок 2а).

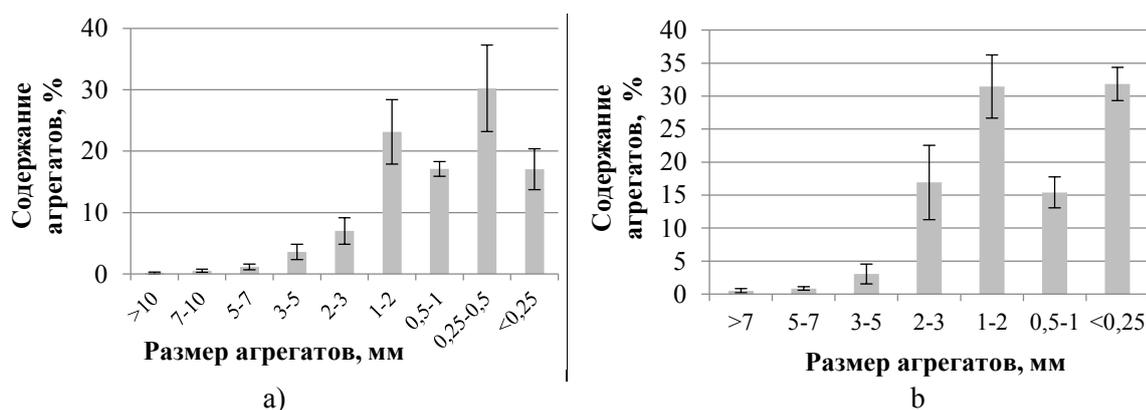


Рис.2. Структурно-агрегатный состав дерново-сильнонамытой почвы (а) и содержание в ней водоустойчивых агрегатов (б), %

Просеивание в воде почвы наносов выявило аналогичную закономерность, что и при просеивании на воздухе: с уменьшением размера фракций увеличивается их количественное содержание. Доля крупных фракций размером от >7 мм до 5–7 мм водоустойчивых агрегатов была ничтожно мала и составляла 0,5–3,0%. Начиная с фракции размером 2–3 мм (16,9%), количество водоустойчивых агрегатов увеличилось в несколько раз: 1–2 мм – 31,4%, 0,5–1 мм – 15,4%, <0,25 мм – 31,8%.

Содержание агрономически ценных агрегатов при просеивании на воздухе было наибольшим в черноземе водораздела (89,0%) и в дерново-сильнонамытой почве (82,8 %), тогда как агрочерноземы были менее оструктурены (71,2 %). Эти изменения произошли за счет роста доли крупноглыбистой фракции. Коэффициент структурности (Кстр) также увеличился в ряду чернозем водораздела → дерново-сильнонамытая почва → агрочерноземы. Значительно изменился показатель средневзвешенного диаметра агрегатов (СВД) при просеивании на воздухе. Наибольший СВД агрегатов при просеивании на воздухе был в агрочерноземах (4,8 мм), в черноземе водораздела несколько меньше (3,1 мм) и еще меньше (1,1 мм) в дерново-сильнонамытой почве (таблица 1).

Содержание агрономически ценных водоустойчивых агрегатов в дерново-сильнонамытой почве было наибольшее (67,6%), а в агрочерноземах снизилось до 50,8%, чернозем



водораздела занимает промежуточное положение (63,8%). Аналогично изменялся коэффициент водоустойчивости ($K_{в}$): наибольший в дерново-намытой почве у подножия склона (2,1), средний по величине в черноземе водораздела (1,8), и наименьшим – в агорчерноземах (1,0).

Таблица 1. Динамика агрономически ценных агрегатов, коэффициента структурности и средневзвешенных диаметров агрегатов в почвах различного использования (0–30 см)

Агрегаты	Количество агрономически ценных агрегатов, %								
				$K_{стр} / K_{в}$			СВД, мм		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Агрономически ценные агрегаты (просеивание на воздухе)	89,0	71,2	82,8	8,1	2,5	4,8	3,1	4,8	1,1
Водоустойчивые агрегаты (просеивание в воде)	63,8	50,8	67,6	1,8	1,0	2,1	1,8	1,2	1,3

Примечание: а – чернозем на водоразделе;
b – агрочернозем;
c – дерново-сильнонамытая почва.

Аналогично уменьшился СВД агрегатов при просеивании в воде: с 1,8 в черноземе водораздела до 1,2–1,3 мм в агрочерноземах и дерново-намытой почве. По-видимому, воздействие сельскохозяйственных орудий и перемещение агрегатов с потоками воды приводит к разрушению их структуры, выносу и вымыванию органического вещества и основных элементов питания.

Стокорегулирующая роль лесной полосы проявляется в предотвращении стока и смыва почвы. В среднем смыв почвы с пахотных земель составляет 5,8 т/га, при этом размах колебаний изменяется от 2,5 до 13,1 т/га (Гаевая и др., 2023).

Лесные полосы, расположенные на водоразделах, способны задержать смывную почву. Однако в результате выноса питательных веществ с возрастающим валовым сбором урожая сельскохозяйственных культур и без должного их возврата, происходит усиление минерализационных процессов, почвоутомление.

Для изучения содержания гумуса в различных по размеру почвенных агрегатах в агрочерноземах, почва была рассеяна на 5 фракций, мм: >10; 3–7; 1–3; 0,25–0,5 и <0,25. За контроль была взята почва на водоразделе под стокорегулирующей лесной полосой, в которой была не нарушена структура в течение около 50 лет. Исходное содержание гумуса в образцах чернозема из слоя 0–30 см с ненарушенным сложением под лесной полосой было $5,43 \pm 0,08$ %. В агрочерноземах, находящимся длительное время в сельскохозяйственном землепользовании, содержание гумуса было меньше $3,65 \pm 0,06$ % (рис. 3).

После определения гумуса в образцах различных фракций, полученных при просеивании на воздухе, были выявлены следующие закономерности. В агрочерноземах количество гумуса в агрегатах изменялось незначительно от $3,62 \pm 0,02$ % до $3,66 \pm 0,04$ %, в пределах ошибки опыта ($p > 0,05$). В черноземе под лесной полосой с уменьшением размера агрегатов – увеличивалось содержание гумуса ($p < 0,05$). В крупноглыбистых агрегатах (>10–7 мм) количество гумуса было равно $4,64 \pm 0,11$ %, в мезоагрегатах размером 3–7 и 1–3 мм – $5,17 \pm 0,10$ – $5,38 \pm 0,07$ %, а в микроагрегатах размером 0,5–0,25 и <0,25 мм содержание Сорг. увеличилось соответственно до $5,45 \pm 0,10$ и $6,54 \pm 0,17$ %.

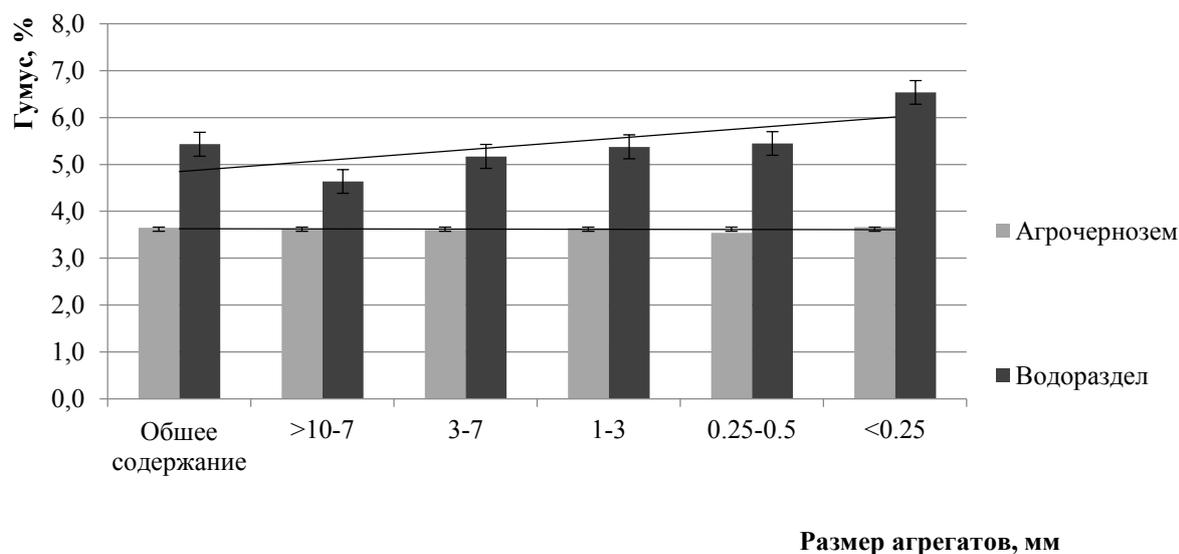


Рис. 3. Содержание гумуса в слое 0–30 см в почвах разного землепользования (агрочернозем и лесополоса), %

Столь значительные различия (28,0–78,6%) в содержании гумуса в почвах различного землепользования, по-видимому, связаны с ее структурным составом. Пахотные почвы плохо оструктурены, имеют большее количество микроагрегатов пылеватой фракции. В результате систематического выноса органического вещества и питательных веществ, воздействия на почву сельскохозяйственных орудий нарушаются межагрегатные связи. Тогда как почва под лесной полосой, имеющей мощную подстилку от 5 до 10 см из листьев и опада, постоянно пополняется свежим органическим веществом, участвующим в образовании гумуса. Поэтому в почве под лесной полосой содержание гумуса выше, чем в пахотных землях.

Для предотвращения процессов деградации на приводораздельных склонах необходимо использовать контурную организацию территории с размещением линейных рубежей (лесных полос и др.) по горизонталям местности под углом 75–90° к направлению стока. Для увеличения стокорегулирующей роли, особенно на ложбинных склонах крутизной 3–8° целесообразно лесные полосы усиливать простейшими гидротехническими сооружениями – валами-канавами (Кравченко, 2009; Полуэктов, 2020).

Выводы

Переход на систему контурно-мелиоративного земледелия с использованием стокорегулирующих лесных полос, усиленных валами-канавами, позволяет предотвращать эрозию почв. Чернозем водораздела наиболее хорошо оструктурен, количество агрегатов крупно глыбистой фракции размером >10 мм (5,8%) и пыли <0,25 мм (5,2%) практически одинаково, а количество мезоагрегатов больше на 4,6–51,0%, чем в агрочерноземах. Водоустойчивые свойства чернозема приводораздельной лесополосы проявляются в уменьшении количества пылеватой фракции на 41,1%, по сравнению с агрочерноземами. В дерново-сильнонамытой почве по мере уменьшения размера фракций увеличивается их содержание как при просеивании на воздухе (17,1%), так и в воде (31,8%). Содержание гумуса в почвенных агрегатах различного размера в агрочерноземах изменяется незначительно в пределах от $3,58 \pm 0,04\%$ до $3,65 \pm 0,06\%$. В почве под лесной полосой на



водоразделе содержание гумуса увеличивается от $4,64 \pm 0,11\%$ в макроагрегатах размером $>10-7$ мм до $6,54 \pm 0,17\%$ в микроагрегатах размером $<0,25$ мм.

Благодарность

Исследование выполнено на базе Южного федерального университета за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00418, <https://rscf.ru/project/23-27-00418/>

Литература

- Гаевая Э.А., Безуглова О.С., Нежинская Е.Н. (2022). Агрофизические свойства чернозема обыкновенного слабоэродированного в длительном опыте в Ростовской области. *Почвоведение*. **11**, 1399–1414. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22110053>,
- Горбов С.Н., Безуглова О.С. (2014) Специфика органического вещества почв Ростова-на-Дону. *Почвоведение*. №8, 1–11.
- Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2021 году. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. 206 с.
- Засоба В.В. (2017). Структурная характеристика чернозёма обыкновенного в массивных лесных насаждениях в степных условиях Краснодарского края. Актуальные проблемы лесного комплекса; Под общей редакцией Е.А. Памфилова. Брянск: БГИТУ. Вып. 49. С. 37–38.
- Засоба В.В., Чеплянский И.Я., Поповичев В.В. (2019). Семидесятилетний опыт создания государственных защитных лесных полос в степной зоне России. *Живые и биокосные системы*. **27**. <https://jbks.ru/archive/issue-27/article-3>
- Кравченко А.Н. (2009). Запасы влаги в почве и её водопроницаемость на склонах при залесении балок. *Плодородие*. **6**, 47–48.
- Маштаков Д.А., Автономов А.Н. (2018). Особенности проектирования и создания противоэрозионных массивных лесных насаждений. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. **4 (40)**, 46–55.
- Полуэктов Е.В. (2020). Эрозия почв и плодородие: монография; Новочерк. инж.-мелиор. ин-т Донской ГАУ. Новочеркасск: Лик. 229 с.
- Скрипников П.Н. (2023). Особенности накопления и профильного распределения углерода в почвах Ростовской агломерации: автореф. ... к.б.н. Ростов-на-Дону, ЮФУ. 23 с.
- Трофимов И.Т., Беховых Ю.В., Болотов А.Г., Сизов Е.Г. (2014). Влияние листовенных лесных насаждений на физические свойства почв. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. **1(111)**, 034–039.
- IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.



УДК 626.814

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ГИДРОИЗОЛИРУЮЩИХ ПОЛИМЕРНО-МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СОЗДАНИИ ИСКУССТВЕННЫХ ВОДОЕМОВ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ КАЗАХСТАНА

Багбеков Р.К., Богданов А.Н., Фельдшеров Ю.В., Шахназаров А.А.

НИИ механики МГУ, Москва
bogdanov@imec.msu.ru

EXPERIENCE IN THE IMPLEMENTATION OF WATERPROOFING POLYMER-MINERAL MATERIALS IN THE CREATION OF ARTIFICIAL RESERVOIRS IN THE FIELD IN KAZAKHSTAN

Bagbekov R.K., Bogdanov A.N., Feldsherov YU.V., Shakhnazarov A.A.
Research Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Annotation: The results of the practical application of water-saving technologies developed in laboratory conditions based on the introduction of polymer-mineral mixtures into the soil forming waterproof layers are presented. These measures are carried out in order to equip multi-scale artificial reservoirs (reservoirs) in the field conditions of arid areas and areas of seasonal natural water supply to lands used for agricultural purposes.

Введение

В настоящее время этап перехода от инвентаризации природы к управлению землепользованием считается уже пройденным (Розанов, 1984). В этой связи одним из актуальных направлений прикладной механики природных процессов становится поиск методов решения проблем предшествующего недалёковидного природопользования, их катастрофических последствий, ставших широко распространённым бедствием. Одним из существенных проявлений современного экологического кризиса является истощение пресных вод во многих земледельческих регионах.

В условиях современных реалий монетизации научно-исследовательских работ и их результатов требуется уже не только теоретический вывод из проведенного исследования, а значимый практический результат от его внедрения.

В природопользовании особо важное значение в настоящее время приобретает именно рациональное использование природных ресурсов. Правильно решенная задача, как и успешно преодолённая проблема в этой области дают надёжный ориентир в разрешении вопросов, поставленных практическим земледелием и водопользованием и связанными с ними отраслями народного хозяйства.

Одним из вариантов обустройства долговременных водоаккумулирующих и водосберегающих бассейнов в полевых условиях является создание водонепроницаемых слоев на дне и боковых поверхностях имеющегося природного или искусственно созданного водоема, препятствующих потерям воды от ее просачивания через границы водоема в грунт. Этот способ является перспективным и более предпочтительным, поскольку другие известные способы использования для водозадержания искусственных пленок, природных пород и т.п. недолговечны, уязвимы к механическим повреждениям, недешевы.

При том, что преимущества строительства искусственных водоемов очевидны, они не указаны среди предлагаемых технических способов восполнения недостатка пресной воды, в то время как приведены следующие варианты (Розанов, 1984):

1. Опреснение соленой воды;
2. Межбассейновое перераспределение речного стока (поворот рек!);



3. Использование айсбергов Антарктики;
4. Использование высокогорных ледников путем организации форсированного снеготаяния;
5. Бурение сверхглубоких скважин;
6. Создание искусственных подземных резервуаров воды; к преимуществам этого технического решения отнесены снижение потерь воды на испарение, перевод поверхностных стоков в подземные (особенно в периоды избытка атмосферных осадков), использование трещиноватости плотных горных пород, создание специальных гидравлических ситуаций откачкой воды из выбранных слоев и усиление ее фильтрации в другие слои.
7. Искусственное увеличение атмосферных осадков;
8. Очистка сточных вод;
9. Организация оборотного водоснабжения;
10. Экономия водных ресурсов.

Аккумуляции воды в открытых водоемах косвенно способствует возникновению ряда дополнительных преимуществ такого водопользования. К ним можно отнести улучшение физико-химических свойств воды, например, ее обезжелезивание (подземные воды часто имеют повышенное содержание растворенного железа; в условиях открытого контакта воды с воздушной атмосферой оно естественным образом окисляется атмосферным кислородом и выпадает в виде твердых осадков), очищение воды от механических примесей при отстаивании и т.д.

Объекты и методы

Авторы исходили из следующего. Полимерно-минеральные материалы (далее – ПММ) создаются в НИИ механики МГУ уже несколько десятилетий (Цатурян и Шахназаров, 2019), на них получены патенты (Григорян и др., 1992). Давая этим материалам общую характеристику, важно отметить их уникальность. По своему составу созданные ПММ есть твердое взаимодействующее с водой вещество, с присущими только ему свойствами – оно не горит, не имеет токсичных свойств, не подвергается разложению микроорганизмами. Его основу составляют глинообразный минерал и органический полимер, во взаимодействии начинающие играть роли, приводящие к проявлению у образующейся смеси гидронепроницаемых свойств, необходимых для ее использования в гидроизоляционных целях, для которых она была создана.

К настоящему времени создан ряд ПММ с гидроизолирующими свойствами.

1. Универсальный ПММ – «Кавеласт» (Григорян и др., 2011). Уникальной является его способность при достаточном увлажнении увеличивать свой пространственный размер (объем) до 50 раз. Водопоглощение не зависит от размера составляющих ПММ «Кавеласт» частиц, физико-химическое качество воды (жесткость, щелочно-кислотность и т.п.) влияет на скорость водопоглощения при набухании (наибольшее наблюдается у дистиллированной), но не бывает критически значимым. Изменение электролитических характеристик воды (наличие электрозаряженных частиц) также не является определяющим в этих работах.

Составляющие ПММ «Кавеласт» компоненты, глина и полимер, по-разному образуют и, затем, стабилизируют этот материал. После его формирования он физически не является больше ни глиной, ни полимером, ни их простой механической смесью. Минеральные частицы глины можно рассматривать как матричную основу, в сухом состоянии



обеспечивающую высокую механическую прочность ПММ «Кавеласт», а при увлажнении превращая его в твердое пластично деформируемое тело в гелеобразном состоянии.

В свою очередь, молекулы полимера обеспечивают прочные связи всех составляющих частей в формацию устойчивых композитных макрочастиц с единой микрогетерогенной структурой. Сближение глино-полимерных флокул (lat. *flocculi* клочья, хлопья) – относительно крупных хлопьевидных скоплений твердых примесей в жидкости – путем удаления разделяющей их воды приводит к установлению дополнительных связей между всеми составляющими ПММ «Кавеласт» компонентами. По-видимому, эти межфлокулярные связи не являются химическими ковалентными, а представляются действием межмолекулярных сил Ван-дер-Ваальса – Лондона. Такая целостная микрогетерогенная сетчатая структура присуща и сухому, и влагонасыщенному состоянию ПММ «Кавеласт» в гелеобразной форме. Отметим, что вода в данном случае не выступает ни в качестве растворителя, ни в качестве смазки. Самопроизвольный переход частиц ПММ «Кавеласт» мелкой фракции в окружающую водную среду предотвращается межмолекулярными связями. Наличие свободных молекул полимера в воде при использовании ПММ «Кавеласт» также не наблюдалось. Сохранение целостности структуры и всего комплекса свойств ПММ «Кавеласт» при сильном измельчении, последовательном увлажнении и высушивании, нагревании до температур плавления полимера, замораживании и оттаивании считается определенно установленным. Лабораторные исследования показали, что связывание молекул полимера с минеральными частицами является необратимым и осуществляется адсорбционными силами.

2. После разработки ПММ первого поколения по инициативе специалистов НИИ механики МГУ были продолжены работы по созданию новых ПММ целевого назначения. Эти работы преследовали также цели упрощения технологии промышленного выпуска материалов, удешевления их производства, улучшения качества в достижении решения именно назначенных задач (индивидуализация целей ПММ) и т.д.

Для выполнения высокоэффективной гидроизоляции подземных сооружений в промышленно-гражданском строительстве, строительстве гидротехнических сооружений – дамб, плотин, прокладке каналов, обустройстве водохранилищ, резервуаров и т.д. был разработан ПММ «Натлен». Этот ПММ представляет собой сухую смесь из фракционно отобранных песков и водонабухающих добавок. ПММ «Натлен» промышленно выпускается согласно ТУ 5745-012-01373565-02, сертифицирован, имеет санитарно-эпидемиологическое заключение). Гидроизолирующие свойства ПММ «Натлен» основаны на других принципах, нежели у ПММ «Кавеласт». Внесенный в сухом виде в грунт, при поступлении к нему воды он растворяется в ней, образуя гелеобразную гидронепроницаемую смесь.

К основным преимуществам ПММ «Натлен» относятся:

- ПММ «Натлен» имеет высокую эффективность как водоизолирующий материал, слой ПММ толщиной 5 см выдерживает статическое давление до 100 м вертикального водяного столба;
- ПММ «Натлен» допускает укладку на влажные поверхности;
- ПММ «Натлен» не образует трещин при статических и динамических нагрузках, не имеет стыков;
- ПММ «Натлен» не токсичен, экологически чист;
- ПММ «Натлен» имеет высокую стойкость к неполярным жидкостям (нефть, масла, бензин) и другим воздействиям;



– ПММ «Натлен» морозостоек, выдерживает не менее 200 циклов промерзания/оттаивания, пучение при промерзании находится в промежутке показателей песка и супеси.

Специалистами НИИ механики МГУ была разработана промышленная технология высоко-производительного выпуска нужного количества ПММ, не требующая специализированного оборудования, проведения трудоемких подготовительных работ или использования сложных технологических процессов и процедур.

Технология выработки ПММ была усовершенствована путем введения специальных добавок, хорошо показала себя также предварительная обработка составляющих компонентов – глины и полимера.

Цвет ПММ (хотя он совсем несущественен для его успешного применения в гидроизоляционных целях) задается оттенками исходной минеральной основы (сырья).

Разработана модификация ПММ «Натлен» – ПММ «Натлен-2» – для приготовления гидро-изолирующей пасты, предназначенной для ликвидации течей в подземных сооружениях (коллекторы, тоннели метрополитена, шахты, убежища гражданской обороны, подземные хранилища, гаражи и т.п.). В готовом состоянии паста на основе ПММ «Натлен-2» не твердеет и всегда находится в мягко-пластичном состоянии, допускает изменение характеристик вязкости в широких пределах, не образует трещин при статических и динамических нагрузках, имеет высокую проникающую и тампонирующую способность, свободно подается в назначенное место по шлангам подачи и не засоряет их.

Для гидроизоляционных работ ПММ «Натлен» постоянно применяется с 2000 года. После его разработки специалистами НИИ механики МГУ был проведен цикл лабораторных исследований гидроизолирующих свойств смесей природного грунта разного качества и свойств с ПММ «Натлен», изготовленным по специальной технологии. Оптимальные параметры водонепроницаемого слоя с использованием ПММ «Натлен» для создаваемого водоема были ранее определены в ходе лабораторных экспериментов.

Экспериментальная отработка нормативов на толщину гидроизолирующего слоя.

Математическое моделирование процессов фильтрации в природных грунтах достаточно сложно, требует больших временных затрат и дополнительной валидации и верификации полученных сведений в эксперименте. В целях настоящего исследования в настоящее время оно полностью сведено к разработке физической модели, после чего заменено натурным экспериментом, осуществление которого вполне выполнимо в обычных лабораторных условиях на имеющейся в НИИ механики МГУ экспериментальной базе.

В целях определения влияния неблагоприятных погодных или иных природных условий была проведена серия испытаний водонепроницаемых свойств слоя при разнохарактерном изменении внешнего давления и высоты водного столба над грунтом (повышение, понижение).

Эксперименты проводились в лаборатории биомеханики. В специальную герметизированную колбу (рис. 1) с регулируемым давлением засыпался слой грунта, на который укладывался водонепроницаемый слой из смеси ПММ «Натлен» с нижерасположенным грунтом в различных пропорциях ПММ «Натлен» / грунт около базового соотношения 35 / 65. Толщина водоизолирующего слоя изначально составляла 10 см с последующим уплотнением до достижения 70% толщины исходного слоя. Давление плавно изменялось до величин, соответствующих давлению на глубине водоема от 1 до 57 м. В процессе эксперимента контролировалось просачивание воды через нижний слив колбы. Отсутствие просачивания свидетельствовало о надежном сохранении

водонепроницаемым слоем своих гидрофобных свойств при данных давлениях. Эксперименты позволили провести оценку запаса прочности водонепроницаемого слоя.

Проведенные эксперименты показали надежность водонепроницаемого слоя в отношении опасности образования в нем при изменении внешнего давления механических повреждений – разрывов, трещин или им подобных дефектов, нарушающих его водоизоляционные свойства. Фиксации нарушений такого рода не было.



Рис. 1. Лабораторная установка для определения параметров водоизолирующего слоя

Результаты лабораторного исследования

Лабораторные эксперименты показали универсальность применения ПММ «Натлен» в смесях с различными природными грунтами – для всех вариантов был получен положительный эффект – уложенный слой ПММ «Натлен» определенной (рассчитанной) толщины надежно демонстрировал свои гидроизоляционные свойства.

Опыт внедрения технологии создания искусственных водоемов.

Создание искусственных водохранилищ с использованием гидроизоляционных слоев из смесей ПММ и грунта на поверхностях водоема является не первым опытом для специалистов НИИ механики МГУ. Ранее, в 1991–1993 годах, искусственные водоемы с использованием ПММ «Кавеласт» были созданы в греческой префектуре (номе) Флорино (Западная Македония).

Водоемы располагались на равнинной поверхности, почва представляла собой супесь с примесью глины. Гидроизолирующий ПММ был привезен из Москвы. Поверхность водоемов составила 15 000, 55 000 и 20 000 кв. м, глубина – до 6 м, поскольку аккумулируемая вода предназначалась для полива теплолюбивых растений и должна была

прогреваться. Источником воды служили артезианские скважины, водные потоки сезонного характера, атмосферные осадки.

Водоемы успешно функционируют до сих пор.

Характеристика почв Отырарского района Туркестанской области Республики Казахстан.

Используя данные о почвах Казахстана (Агрогидрологические свойства почв Казахстана, 1988), в отношении почвы в Отырарском районе Туркестанской области Республики Казахстан можно сказать следующее.



Рис. 2. Вид площадки обустройства водоема

В Казахстане преобладает равнинный рельеф местности, составляющий 86% территории республики. На равнинах выделяются три типа почв: черноземы (располагаются до 52° с.ш.), каштановые (между 52 и 48° с.ш.), бурые и серо-бурые (южнее 48° с.ш.). Бурые и серо-бурые почвы занимают 120 млн га, или 44% территории республики. Содержание гумуса в этих почвах 2,0-1,0%. Основное направление сельскохозяйственной деятельности на таких почвах – животноводство, земледелие возможно лишь на орошаемых землях.

Почвы южных районов Казахстана подвержены ветровой эрозии. Это обусловлено, во-первых, равнинным рельефом этой части Казахстана, во-вторых, частыми сильными ветрами и, в-третьих, легким весовым составом почвы (песчаным, супесчаным). Хозяйственная деятельность, в частности, обустройство искусственных водоемов, на таких землях требует особой тщательности в проработке предлагаемых к осуществлению мероприятий по землеустройству.

Внедрение результатов исследования в Туркестанской области Казахстана.

Определение надежных характеристик гидроизоляционного слоя с использованием ПММ «Натлен» позволило в мае 2022 года создать искусственный водоем объемом 1280 куб. м.

Работа была выполнена в Отырарском районе Туркестанской области Республики Казахстан.

Геометрически водоем представлял собой перевернутую усеченную пирамиду с основанием 25x30 м и глубиной до 2,6 м. Угол наклона боковых стен от горизонта составлял

не более 25,4 градусов и оказался универсален для любых типов водоемов. Такой уровень наклона боковых стенок гарантировал отсутствие сползания содержащих ПММ «Натлен» слоев с ограничивающих водоем поверхностей.

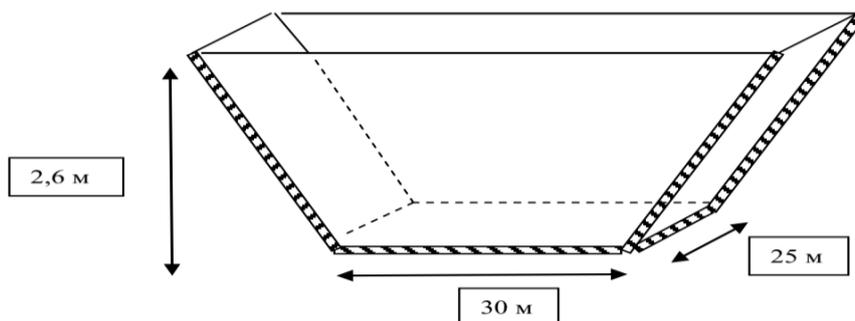


Рис. 3. Схема водоема.

Этапы обустройства водоема.

Выборка грунта при рытье котлована под водоем после предварительной разметки была выполнена экскаватором. Последующая планировка почвы произведена колесным бульдозером К-700 (гусеничная техника сильно нарушает целостность поверхности почвы). Выполнена доработка котлована вручную.

Перед выполнением смешивания с ПММ «Натлен» грунт предварительно просеивался через механические сита $\varnothing 5$ мм для достижения однородности смеси. Механическое смешивание грунта и ПММ «Натлен» осуществлялось в автоматических бетономешалках. Уложенный слой ПММ «Натлен» толщиной 10 см уплотнялся ручным катком весом 150 кг шириной 1,5 метра до толщины 70% исходного. После такой укатки механическое воздействие от прохода человека средней массы тела на укатанном слое ПММ «Натлен» не оставляло следа. Заметим здесь, что заполняющая водоем вода в дальнейшем оказывает дополнительное уплотняющее воздействие. Укатанный слой ПММ «Натлен» покрывался слоем почвы такой же толщины. Дно водоема было дополнительно забетонировано для удобства дальнейшего удаления осадков, выпадающих из природной воды или заносимых в водоем другими путями. Был также обустроен боковой бетонный заход (заезд) в водоем. Берега водоема были дополнительно укреплены бетонной отмосткой шириной до одного метра по всему периметру.

Отметим ряд общих требований и рекомендаций к проведению водоаккумулирующих мероприятий. Работы по обустройству водоема невозможно проводить во время сезона дождей из-за набухания почвы. В засушливые периоды жаркого сезона грунт превращается в легко переносимую ветрами пыль, неподлежащую уплотнению трамбовкой. Наилучшие условия для проведения работ в Казахстане с октября по февраль.



Рис. 4. Котлован водоема. Для возможности очистки дна водоема от постороннего мусора был предусмотрен мостовой заход со спусковыми лестницами, опоры которого видны на фото



Рис. 5. Укатка ручным катком боковых откосов котлована



Рис. 6. Бетонирование дна водоёма

Конкретные особенности строительства водоема в соответствие с имеющимися условиями местности, почвы, климата и т.д. определяются специалистами по строительству. Основными обстоятельствами в общем случае являются два обстоятельства.

- Во-первых – близость естественных источников воды – рек, каналов, артезианских скважин и т.п. Источники воды могут быть сезонными. На случаи засушливых сезонов следует предусмотреть дополнительные возможности поступления воды – из подземных источников.

- Во-вторых – близость земель, орошение которых планируется.

- Среди прочих обстоятельств, которые следует учесть – удаленность древесных насаждений, поскольку водоём будет засоряться опадающей листвой и терять свои качества.

Использованная в описанном случае технология предельно проста. Заполнение обустроенного водоема производилось из двух артезианских скважин глубиной 90 метров и через трубу Ø100 мм из близ расположенного оросительного канала.



Рис. 7. Водоем в Отырарском районе Туркестанской области Республики Казахстан в процессе заполнения. Видна конфигурация береговых откосов, береговая бетонная отмостка, съезд в водоем, ограда водоема.

Для контроля эффективности работы водонепроницаемого слоя рядом с бассейном был выкопан колодец такой же, что и бассейн, глубины. При заполнении бассейна осуществлялось заполнение водой и колодца, после чего производились наблюдения сохранности воды в нем. Вода быстро уходила из него в почву.

При том, что ПММ «Натлен» относительно слабо набухает в соленой или жесткой воде, это обстоятельство не является и не явилось препятствием в реализации поставленной задачи успешного создания и дальнейшего длительного устойчивого функционирования созданного водоема, а требует только перерасчета необходимого количества ПММ «Натлен» и достаточного времени на набухание.



Площадь водной поверхности бассейна составила 775 кв.м. По данным эксплуатирующей организации, ТОО "НПЦ инновационных технологий KZ", убыль воды от испарения в августе 2023 года составила 78 куб.м (6%) при средней температуре $32\div 36$ 0С, влажности $18\div 29\%$, скорости ветра $4\div 5$ м/с.

Авторы особо подчеркивают то обстоятельство, что при любой, возможно немалой, себестоимости использованного при обустройстве водоема ПММ «Натлен», основным доводом в пользу его применения является обеспечиваемая им долговечность функционирования сооруженного по такой технологии водоема, позволяющее при минимальных расходах на дальнейшее техническое обслуживание бассейна иметь стабильный запас воды. Такие перспективы гарантируют экономическую оправданность средств, потраченных на обустройство водоема

Заключение

Разработанная экспериментальная методика определения параметров водоизолирующего слоя из смесей грунта и ПММ позволяет надежно рассчитывать параметры водонепроницаемых слоев для любых типов предоставленных почв с площадей, предусмотренных к обустройству искусственного водоема.

Разработанную технологию создания искусственных водоемов можно успешно применять для обустройства водоотводящих каналов, ремонта и укрепления их стенок и т.п.

Важным обстоятельством является экологическая безопасность примененных полимерно-минеральных материалов.

Проведенные работы должны способствовать дальнейшему технологическому прогрессу в сфере рационального водопользования.

Создание искусственного успешно функционирующего водоема приводилось в пример удачного внедрения передовых технологий рационального землепользования на проведенных в 2023 году в Казахстане региональных научных мероприятиях (Богданов, 2023).

Литература

- Розанов Б. Г. Основы учения об окружающей среде: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 376 с.
- Цатурян А.К., Шахназаров А.А. Лаборатории механики природных процессов и биомеханики /Институт механики 60 лет. Под редакцией профессора Г.А. Любимова. КДУ, Университетская книга Москва, 2019. 290 с.
- Григорян С.С., Гулакян К.А., Шахназаров А.А. «Способ получения полимер- минерального композита». Авторское свидетельство СССР №1707052 А1. Бюллетень №3. 23.01.1992.
- Григорян С.С., Гулакян К.А., Смирнов В.В., Шахназаров А.А. Кавеласт: достижения и перспективы / Избранные проблемы современной механики. / под. ред. академика В.А. Садовниченко. Т. 2. Издательство Московского университета, М.: 2011. С. 180–183.
- Агрогидрологические свойства почв Казахстана: [Справочник] / Каз. респ. упр. по гидрометеорологии и контролю природ. среды, Алма-Ат. гидрометеорол. обсерватория; [Сост. В. Г. Затыльников и др.]. Алма-Ата: Б. и., 1980. 197 с.
- Богданов А.Н. Современные технологии рационального водопользования для народного хозяйства Средней Азии и Казахстана. Международный Научно-производственный семинар "Внедрение полимерно-минеральных материалов в сельское хозяйство Туркестанской области", Туркестан, Kazakhstan, 6-7 ноября 2023.



УДК 004.62:338.012

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, КАК ОСНОВА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАТИЗАЦИИ МЕЛИОРАТИВНОЙ ОТРАСЛИ.

Вахонин Н.К.

¹Международный университет «МИТСО» г Минск Республика Беларусь
nik.vahonin@mail.ru

OPTIMIZATION OF DECISION MAKING AS THE BASIS OF THE EFFECTIVENESS OF
INFORMATIZATION IN THE RECLAMATION INDUSTRY

Vahonin N.K.

MITSO International University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation: The article presents the results of a system analysis of the problem of developing a decision support system in large natural-technical stochastic systems using the example of informatization of the reclamation industry. Alternative options for models of system functioning and their information support are formulated. It is shown that the choice of their optimum is itself a task of goal-oriented decision making

Key words: system analysis, subject area, system functioning model, real sector of the economy, material systems, reclamation industry, reclamation agricultural facility, informatization, decision support system, optimization, goals, criteria, economic efficiency

Введение

Разработка систем поддержки принятия решений в передовых странах мира является одним из важнейших направлений практического использования информационных технологий в различных предметных областях, в том числе связанных с водными ресурсами, для обеспечения ускорения социально-экономического развития общества [1].

Для развитие этого направления в Беларуси с начала двухтысячных годов реализуются пятилетние государственные программы развития информационных технологий. Отличительной особенностью Государственной программы «Цифровое развитие Беларуси на 2021 – 2025 годы» [2], является то что наряду с быстрым формированием новой, инвестиционно привлекательной отрасли «чисто» информационно-коммуникационных технологий: электронная торговля, мобильные приложения, электронные игры, интернет-технологии передачи информации, выполнение заказов на оказание государственных услуг и т.п., особую актуальность имеет, и рассматривается как основа развития экономики страны, информатизация материальных технологий и систем всех традиционных отраслей (предметных областей), реального сектора экономики: сельского хозяйства, промышленности, энергетики, транспорта и др.

При этом, под широко используемым на бытовом уровне словосочетанием цифровизация экономики, следует понимать не перевод на компьютерную основу всей накопленной в отраслях информации на бумажных носителях, а также использующихся докомпьютерных, по неизбежности являющихся предельно упрощенными и, соответственно неточными, методов принятия решений, базирующихся на экспертно-нормативных соображениях (по мнению одного из основоположников искусственного интеллекта, академика Г.С. Поспелова, автоматизация рутины – не прогресс, а регресс).

В условиях конкурентной (рыночной) экономики, под информатизацией отраслей следует понимать реинжиниринг технологий принятия решений – создания автоматизированных информационных систем поддержки принятия решения, в любой из отраслей – подотраслей – хозяйствующих субъектов на всех этапах жизненного цикла должна на основе системного анализа для решения общей задачи выбора оптимального



варианта всех соответствующих им организационных, технологических, технических, конструктивных составляющих материальных технологий, обеспечивающего получение максимального дохода при минимизации затрат. Т.е. в практике функционирования каждой отрасли стоит задача многокритериальной оптимизации, решение которой может осуществляться только на основе информационных технологий.

Наиболее актуальна информатизация в отраслях с большими удельными затратами бизнес-процессов получения производимой продукции, что делает проблему повышения их эффективности наиболее острой. В том числе, это относится к сельскохозяйственному растениеводству, имеющему удельные затраты 500-1000 \$/га, что связано с большой площадной распределенностью и высокой энергоемкостью обработки почвы, как в технологических операциях выращивания сельскохозяйственных растений, так и при создании систем обеспечения их факторов жизни. В частности, большие удельные затраты требуются при создании (1500-2000 \$/га и более) и поддержании в работоспособном состоянии мелиоративных систем, обеспечивающих один из важнейших урожаеобразующих факторов – формирование требуемого сельскохозяйственным растениям благоприятного водного режима, непрерывно на протяжении всего вегетационного периода, в многолетнем разрезе. В сочетании с необходимостью осуществления мелиоративных работ по реконструкции эксплуатации и управлению водным режимом на 2,9 млн. га осушенных земель, ежегодно требуются большие объемы капиталовложений и чрезвычайно актуальна проблема их эффективного использования.

В связи со сложностью мелиоративных систем – базовых технологических элементов мелиоративной отрасли, исследования основаны на системной методологии [3], являющейся основой разработки систем поддержки принятия решений в технологических системах со сложными, тесно взаимосвязанными, и в результате сложно формализуемыми процессами функционирования различной природы (физическими, химическими, биологическими и т.д.), протекающими при производстве продукции.

Результаты и обсуждение

Практика мелиорации и сельскохозяйственного использования мелиорированных земель, являющихся одними из наиболее высоко затратных видов хозяйственной деятельности, делает актуальной проблему принятия оптимальных (“smart”- т.е. “умных”, в переводе с английского) решений ,от момента возникновения желания улучшить водный режим земель для выращивания сельхоз растений, до момента прекращения их сельскохозяйственного использования (после чего при необходимости может быть осуществлен этап ликвидации мелиоративной системы).

Взаимосвязь этапов жизненного цикла (ЖЦ) системы в этот промежуток времени представлена на рисунке 1. В соответствии с ней можно утверждать, что в мелиорации имеет место единая проблема принятия решений: выбора оптимальных стратегий и их характеристик из множества альтернатив, имеющих на каждом из этапов жизненного цикла систем, с учетом их взаимозависимости, при котором поставленные цели достигаются наилучшим образом.

Центральной проблемой постановки задачи оптимизации в мелиорации является формулирование системы целей, выбор варианта иерархического уровня которых и их состава должен согласовываться с уровнем общности рассматриваемой системы.

При этом необходимо учитывать, что чем более высокого иерархического уровня цели приняты, тем большего уровня крупности систему требуется анализировать для прослеживания их достижения. Так как в этом случае оптимум ищется на более широком

множестве альтернатив, то при условии обеспечения надежности расчетов, возрастает эффективность выбираемого оптимального варианта. Однако в результате увеличения при этом сложности модели системы, все более затруднительно обеспечение надежности расчетных зависимостей и сбора их информационного обеспечения.

Для обеспечения выбора эффективных решений необходимо использование системы целей экономико-экологического уровня общности: max доходов от системы, min затрат, max охраны природы за весь период существования мелиоративной системы. В такой постановке оптимальным решением является вариант системы, который наилучшим образом удовлетворяет сформулированным целям с учетом всех этапов ее жизненного цикла: исследование – планирование – проектирование – строительство – эксплуатация – управление – контроль мелиоративной системы. [4]

При этом помимо основных затрат на создание мелиоративной системы (первоначальное строительство, реконструкция), должны учитываться затраты на всех остальных этапах жизненного цикла, включая эксплуатацию и управление системой, а также затраты на принятие решений (многовариантное численное моделирование), в том числе на их информационное обеспечение (изыскания, контроль, мониторинг) при планировании и проектировании мероприятий на каждом из этапов.

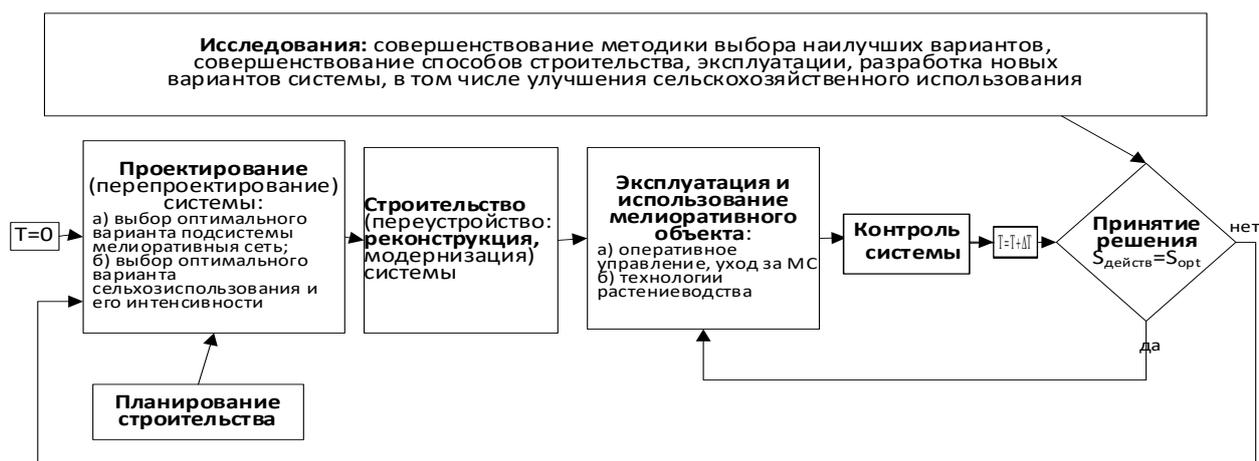


Рис.1 Взаимосвязь этапов жизненного цикла мелиорированного сельскохозяйственного объекта

Необходимость одновременного учета всех сформулированных целей требует осуществления оптимизации в рамках единой системы: - мелиорированный сельскохозяйственный объект (МСХО), включающий тесно взаимосвязанные процессами взаимодействия подсистемы мелиоративная сеть, мелиорируемая почва, выращиваемая сельскохозяйственная растительность, изменяемая окружающая среда [4].

В принципе возможны два кардинально различающихся методологических подхода к выбору оптимального варианта МСХО):

-эмпирическое сравнение различных альтернативных вариантов систем, создаваемых непосредственно в натуральных условиях, однако для больших пространственно-распределенных систем практически не осуществимое из-за невозможности выбора для них площадей с идентичными характеристиками территории и входных воздействий, а также необходимости больших затрат.



- на основе автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений – численного решения задачи многокритериальной оптимизации МСХО, в общем виде представляемой системой в операторной форме (1):

$$\begin{aligned} & \text{extr} \vec{\Phi}(y, a, u, r) \\ & W \subset R^3 \\ y(t) = & F(z(t_0), N, a, u, \xi_t, t) \\ & f(y, z, a, u, r) \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где $\vec{\Phi}$ – вектор критериев; $y(t)$ – вектор-функция выходных воздействий системы; t – время; a – альтернативный вариант системы: множество альтернатив ее управляемых характеристик (тип, вид, структура, вектор регулируемых параметров (глубины, ширины, длины, диаметры проводящей и регулирующей сетей, расстояния между их элементами и т.п.)); $u(t)$ – вектор-функция управлений системой; r – вектор ресурсов; f – вектор искусственно устанавливаемых ограничений на параметры и переменные состояния системы; F – оператор функционирования системы, являющийся естественно-физическим ограничением системы; $z(t)$ – вектор-функция переменных состояния системы; N – вектор нерегулируемых параметров системы; ξ_t – вектор-функция случайных входных воздействий; $W \subset R^3$ – область трехмерного пространства, занимаемая системой, с границей, отделяющей МСХО от окружающей среды.

Наиболее важные последствия (затраты, доходы) имеет принятие обоснованных решений при выборе оптимального варианта системы, осуществляемого на этапе ЖЦ проектирование при первоначальном строительстве и на этапе реконструкция (Рис. 1). В связи с этим наиболее строгие требования к виду, и связанной с ним точности и надежности модели принятия решения (1), соответствуют принятию решений на этих этапах ЖЦ.

Различие строительства и реконструкции лишь в том, что при проектировании первоначального строительства, среди рассматриваемых альтернативных вариантов исходным является вариант без мелиорации, а при перепроектировании – вариант действующей системы, с параметрами, сложившимися в результате ее износа в процессе долгосрочного функционирования. Помимо этого, в случае проводившегося в процессе эксплуатации контроля МСХО, имеются данные для эмпирической оценки функционирования системы.

Принятие решений может осуществляться, как используя бумажные (ручные) докомпьютерные технологии, так и на основе использования автоматизированных информационных систем (ИС), разрабатываемых на основе системной методологии, базируясь на модели принятия решений (1).

Важность автоматизированных систем для проектирования МСХО определяется возможностью формирования более строгой модели (1) и ее численной реализации, благодаря качественно новому уровню производительности компьютерной техники.

Исходя из вышеизложенного очевидно, что выбор варианта разработки и вида модели принятия решений (1), сам является важнейшим решением, при котором необходимо учитывать затраты на ее реализацию, окупаемость которых должна обеспечиваться за счет возрастания урожайности и снижения затрат на создание материальной системы, в результате использования более точной модели принятия решений (1). При этом помимо затрат на создание ИС, должны учитываться и затраты на ее информационное обеспечение.

Оценка эффективности создания автоматизированных систем для других этапов ЖЦ аналогична, но с учетом меньших требований к строгости модели (1), так как наиболее



значимые альтернативы мелиоративной системы (физический принцип, тип, вид структура, параметры, управление), выбираются при ее проектировании.

Необходимо отметить, что альтернативы выбора различных компонентов модели принятия решения (1) взаимосвязаны. В основе лежит выбор уровня общности предметной области, которую целесообразно классифицировать по производственно-территориальному принципу, конкретного вид целей Φ и ограничений f , предопределяющих уровень общности системы и процессы, подлежащие изучению для установления фазовых переменных, влияющих на значение функций цели, а соответственно, необходимый состав ξ_t, N, a .

При этом выбор уровня точности, и соответственно сложности, описывающей их взаимосвязь модели (1), лимитируется наличием математического описания процессов функционирования системы, алгоритмов их решения, возможностями их численной реализации (величины памяти и быстродействия ЭВМ), а также затратами на получение ξ_t, N и осуществление расчетов.

В связи с тем, что МСХО является эволюционирующей системой, то и неуправляемые N , и управляемые параметры, (входящие в альтернативы a , изменяются во времени. В связи с изменением надсистемы могут изменяться входные воздействия $[\xi]_t$, а также цели Φ , возможные ресурсы g и складывающиеся цены. Развитие науки расширяет множество альтернатив, возможность принятия более общих целей Φ , точность используемого оператора функционирования МСХО F , задания N (развитие интернета вещей). В результате этого оптимальный вариант системы со временем изменяется и требуется периодическая проверка его на оптимальность (Рис.1), для чего необходимо осуществление контроля МСХО.

Для рассчитанного при проектировании оптимального варианта МСХО. известны соответствующие ему параметры, переменные состояния, и выходные воздействия. Осуществление на этапе контроля ЖЦ МСХО мониторинга состояния любого из этих показателей может использоваться для сравнительной оценки с текущим состоянием системы и принятия решения о необходимости трансформации мелиоративного сельскохозяйственного объекта (Рис.1).

Выводы

- в общей постановке принятие решений в мелиорации заключается во взаимосвязанном выборе альтернатив на всех этапах жизненного цикла, важнейшие из которых относятся к этапу проектирования – выбора оптимального варианта изменяемых характеристик мелиоративных систем (тип, вид, структура, параметры, управления), на основе решения задачи многокритериальной оптимизации на цели экономико-экологического уровня общности, с использованием модели (1), функционирования единой динамико-стохастической системы мелиоративный сельскохозяйственный объект.

- наряду с многовариантностью выбираемых характеристик мелиоративных систем, альтернативной является и сама модель принятия решений (1), используемая для выбора их оптимальных значений. Точность расчетов при выборе оптимального варианта мелиорации определяется иерархическим уровнем общности целей и критериев, уровнем агрегирования переменных, используемых в модели описания процессов функционирования МСХО (оператор функционирования F), строгостью алгоритмов ее численной реализации, а также точностью задания ее информационного обеспечения. Таким образом альтернативными являются и сами должны выбираться компоненты модели принятия решений (1) по



оптимизации управляемых параметров МСХО. Их выбор зависит от уровня общности рассматриваемой предметной области (отрасль в целом, мелиорируемый водосбор, отдельный МСХО, дренажно-коллекторная система). При этом цели (критерии оптимальности) выбора альтернатив компонент модели (1) те же, что и для выбора оптимальных альтернатив МСХО. Таким образом модель принятия решений сама должна быть целеориентированной.

- в связи с изменением МСХО в процессе службы, с целью периодической оценки необходимости трансформации, обоснованного принятия решений при планировании и проектировании мероприятий на всех этапах жизненного цикла (Рис.1), должен осуществляться контроль характеристик МСХО, для формирования информационного обеспечения, адекватного строгости модели (1) (выбор способов и пространственно-временной густоты точек сбора неизменяемых параметров мелиорируемой территории, входных погодно-гидрологических воздействий и т.п., при изысканиях, мониторинге, контроле и организация их автоматизированного хранения и обработки.).

- аналогичные автоматизированные информационные системы поддержки принятия решений необходимы и в других отраслях реального сектора экономики со сложными технологическими системами, с учетом особенностей описания их бизнес процессов в модели (1). При этом оценка эффективности ИС должна осуществляться, исходя из условия обеспечения увеличения прибыльности материальной системы, за счет оптимизации принимаемых решений с использованием ИС, с учетом затрат на ее создание и использование.

Литература

Abbott M.B. Shipton S. Promoting Distributed Social Teaming And Collaborative Decision Making Through Networking. Report Group-Delphi in cyberspace, IHE, Delft, The Netherlands, 1997. – 78 p.

Государственная программа «Цифровое развитие Беларуси» на 2021 - 2025 годы.
Постановление Совета Министров Республики Беларусь №66, 02.02.2021.

Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – Москва: Наука, 1981. – 487 с.

Вахонин Н.К. (2013) Концептуальные принципы создания единой информационной системы поддержки принятия решений в мелиоративной отрасли. *Мелиорация*. **1 (69)**, 5-19.



УДК 631.412

АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВЕННОГО ПЛОДОРОДИЯ ЧЕРНОЗЕМОВ ОБЫКНОВЕННЫХ КАРБОНАТНЫХ СРЕДНЕ ЭРОДИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Гаевая Э.А., Безуглова О.С.

Федеральный Ростовский аграрный научный центр, п. Рассвет, Россия
e-mail: emmaksay@inbox.ru

ANALYSIS OF PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS OF SOIL FERTILITY OF ORDINARY CARBONATE MEDIUM-ERODED CHERNOZEMS BASED ON THE PRINCIPAL COMPONENT METHOD

E.A. Gaevaya, O.S. Bezuglova
Federal Rostov Agricultural Research Centre, Rassvet village, Russian Federation
e-mail: emmaksay@inbox.ru

Annotation: The analysis of the structural and aggregate composition of ordinary carbonate chernozem (Calcic Chernozem) under the forest strip on the watershed, agrochernozems on the slope, sod-heavily soiled soil at its foot. The analysis of the main components showed that aggregates with a size of 1-0.25 mm and waterproof fractions of 0.5–0.25 mm and <0.25 mm are characterized by the greatest connection with organic carbon and batteries.

Введение

В результате распашки черноземов обыкновенных, несоблюдения севооборотов и нарушения агротехнологий большинство земель в Ростовской области отнесены к категории деградированных. Особенно сильно деградации подвержены почвы на эрозионно-опасных склонах. Развитие процессов эрозии сопровождается систематической потерей гумуса и основных элементов питания. Содержание органического углерода в пахотном слое с каждым годом на смытых участках падает с 4,2–4,7% до 2,3–2,7% (Гаевая и др., 2022). Также в результате длительного воздействия на почву сельскохозяйственных орудий нарушается ее структурное состояние. Ведущую роль в образовании микроагрегатов играет органическое вещество, с его потерей происходит разрушение агрегатов, и снижаются водоустойчивые свойства почвы (Салихов и др., 2023; Тагивердиев и др., 2022). Важную роль в образовании агрегатов наряду с гумусовыми веществами играют поглощенные основания и макроэлементы (Артемьева и др., 2022; Холодов и др., 2016).

Цель исследований являлось выявление наиболее значимых связей между почвенными агрегатами и органическим углеродом, а также и макроэлементами с использованием анализа главных компонент.

Объекты и методы исследований

Исследования были проведены в многофакторном длительном опыте в 1990–2022 гг., который расположен на склоне балки Большой Лог, Аксайского района Ростовской области. Опыт был заложен в 1986 году в системе контурно-ландшафтной организации территории склона крутизной до 3,5–4°, с комплексом гидротехнических приемов и простейших сооружений. Опыт зарегистрирован в Российской Географической сети длительных опытов с удобрениями (аттестат № 169). Почвенный покров участка представлен черноземом обыкновенным карбонатным на лёссовидном суглинке (согласно международной классификации WRB – Calcic Chernozem (Pachic Loamic)).



Определение структурно-агрегатного состава почвы проведено в образцах с ненарушенной структурой. Выделение агрегатов и определение водоустойчивости структурных отдельностей проведено просеиванием на воздухе и в воде по методу Саввинова. Агрохимические анализы почвы проводили по общепринятым методикам: определение содержания гумуса по Тюрину (ГОСТ 26213-91); N-NO₃ (ГОСТ 26951-86); N-NH₄ (ГОСТ 26489-85); фосфор и калий по Мачигину (ГОСТ 26205-91) и рН (ГОСТ 26483-85).

Для изучения означенных свойств почвы была заложена катена на средне эродированном склоне крутизной 3,5–4°. Первый разрез был заложен на водоразделе на опушке стокорегулирующей лесополосы, глубина разреза 150 см, мощность гумусового горизонта 80 см. Его полевое определение – чернозем миграционно-сегрегационный (обыкновенный карбонатный) мощный малогумусный тяжелосуглинистый на лессовидной легкой глине. Два следующих разреза на расстоянии 150 и 250 м от водораздела представляют агрочернозем на опытном поле. Их глубина 130–140 см, мощность гумусового горизонта – 40–50 см. Полевое определение – агрочернозем миграционно-сегрегационный (обыкновенный карбонатный) слабосмытый среднемошный малогумусный тяжелосуглинистый на лессовидном суглинке. Четвертый разрез был заложен у подножия склона на расстоянии 300 м и представляет дерновую-сильнонамытую почву, глубина разреза 210 см, гумусового горизонта – 200 см. Результаты обследования почвенных разрезов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Химическая характеристика чернозема обыкновенного, используемая для анализа главных компонент

Table 1. Chemical characteristics of ordinary chernozem used for the analysis of the main components

Разрез, координаты	Глубина, см		N-NH ₄ N-NO ₃ P ₂ O ₅ K ₂ O				рН	Гумус
			мг/кг					%
Чернозем миграционно-сегрегационный (обыкновенный карбонатный) мощный малогумусный тяжелосуглинистый на лессовидной легкой глине								
Водораздел;	0–15	Ad	9,42	33,9	84,6	936,9	7,19	5,38
47.373221° с.ш.;	30–40	A1	4,14	10,0	27,5	229,4	7,88	4,05
39.912329° в.д.	55–60	B1	3,03	3,4	5,9	200,8	8,10	3,09
Агрочернозем миграционно-сегрегационный (обыкновенный карбонатный) слабосмытый среднемошный малогумусный тяжелосуглинистый на лессовидном суглинке								
Агрочернозем	0–15	A _{пах1}	4,88	3,5	64,8	381,0	8,25	3,72
02;47.371454° с.ш.;	15–30	A _{пах2}	4,99	1,9	75,0	400,8	8,14	4,00
39.913273° в.д.	30–40	A _{подпах}	2,29	-	50,5	239,0	8,20	3,71
Агрочернозем миграционно-сегрегационный (обыкновенный карбонатный) среднемошный малогумусный тяжелосуглинистый на лессовидном суглинке								
Агрочернозем 03;	0–25	A _{пах}	5,25	5,1	39,7	305,9	8,12	3,71
47.372150° с.ш.;	30–40	A _{подпах}	3,37	1,7	6,4	162,5	8,29	3,33
39.915602° в.д.	60–70	B1	0,97	1,8	3,9	143,4	8,44	2,38
Дерново-сильнонамытая почва								
	0–30	A _{пах}	4,15	-	65,9	258,1	7,04	4,39
	30–40	A _{подпах}	4,69	1,6	42,5	229,5	7,06	4,19
Сильнонамытая;	50–60	A1	1,68	1,4	11,1	186,4	7,26	3,49
47.368926° с.ш.;	80–90	A1'	1,29	1,4	10,1	172,1	7,44	2,93
39.913790° в.д.	105–115	A1''	1,14	-	12,6	153,0	7,40	2,55
	130–140	A1'''	0,50	-	14,7	124,3	7,82	1,85
	150–160	AC	0,46	-	15,8	133,8	7,60	1,48



Для уменьшения размерности данных был использован анализ главных компонент (Principal Component Analysis – PCA) который является одним из широко используемых методов, направленных на изучение закономерностей при обработке многомерных данных. Он считается наиболее эффективным способом понижения размерности данных, позволяющий описывать объекты меньшим числом обобщенных показателей – главными компонентами (ГК). Анализ проведен на основе корреляционной матрицы с использованием программного обеспечения STATISTICA (2020).

Обсуждение результатов

Структурно-агрегатный анализ слоя почвы 0–30 см, отобранной на водоразделе, выявил, что при просеивании на воздухе количество агрегатов крупно глыбистых фракций размером >10 мм (6,5%) и 7–10 мм (7,0%), а также мелких фракций размером 0,5–0,25 мм (7,5%) и пыли <0,25 мм (6,4%) практически одинаковы. Однако доля мезоагрегатов размером 3–5 мм (18,7%) и 1–2 мм (19,0%) в 2–3 раза выше по сравнению с остальными фракциями. Это подтверждает и линия тренда на графике, показывающая относительно равномерное распределение фракций (рис. 1а).

Структурно-агрегатный состав агрочернозёма и дерново-сильнонамытой почвы имеет некоторое сходство: количество макроагрегатов размером >10 мм наибольшее (18,2–26,0%), при наименьшем количестве пылеватых частиц (5,0–10,6%). В подпахотном горизонте количество крупноглыбистых фракций (5,9–6,8%) и пылевидных фракций (4,5–6,0%) незначительно отличается между почвой на водоразделе и в агрочерноземе. Исключение составляет сильнонамытая почва, в составе которой отмечено преобладание крупноглыбистой фракции (25,1%) при незначительном количестве пылеватых частиц (3,2%) (рис. 1б).

Динамика водоустойчивых агрегатов отражает общую закономерность всех изучаемых почв, как в пахотном, так и в подпахотном горизонтах (рис. 2а-б).

С уменьшением размера агрегатов увеличивается количество пылеватых частиц. Наименьшее количество водоустойчивых агрегатов было отмечено во фракциях размером >7 мм (2,1–4,8%) в пахотном и (0,6–4,5%) – в подпахотном горизонтах. При этом количество пылеватых частиц было наибольшее (30,4–47,1%) и (33,3–46,3%). Такое сходство в распределении водоустойчивых агрегатов указывает на общее происхождение всех изучаемых почв.

Большое количество показателей затрудняет проведение всесторонней оценки результатов исследования, поэтому для понижения размерности данных, поиска неявных взаимосвязей, вносящих наибольший вклад в различия между объектами, а также классификации переменных был использован анализ главных компонент. Этот анализ считается наиболее эффективным способом уменьшения количества данных, полученных в результате просеивания почвы на воздухе и в воде, а также ее химическими свойствами, позволяющим описывать объекты меньшим числом обобщенных показателей – главными компонентами (ГК) (Ушаков и др., 2021).

При построении факторной модели агрофизических и агрохимических параметров почвенного плодородия предполагается, что каждый из двадцати двух перечисленных параметров представляющих собой конечный результат совместного влияния некоторых непосредственно не наблюдаемых факторов: общих – связанных значимыми коэффициентами корреляции более чем с одним параметром и индивидуальных – отражающих специфичность одного исходного параметра.

Поэтому для сокращения числа переменных и наблюдений, а также определения структуры взаимосвязей между ними, при помощи создания нового факторного пространства был использован анализ главных компонент (РСА) – метод многомерной статистики. Выявление связей при большом наборе данных в корреляционно-регрессионном анализе является трудной задачей, поэтому ставится задача сжатия изучаемых переменных более укрупненными категориями или показателями, которые называются главными компонентами (ГК).

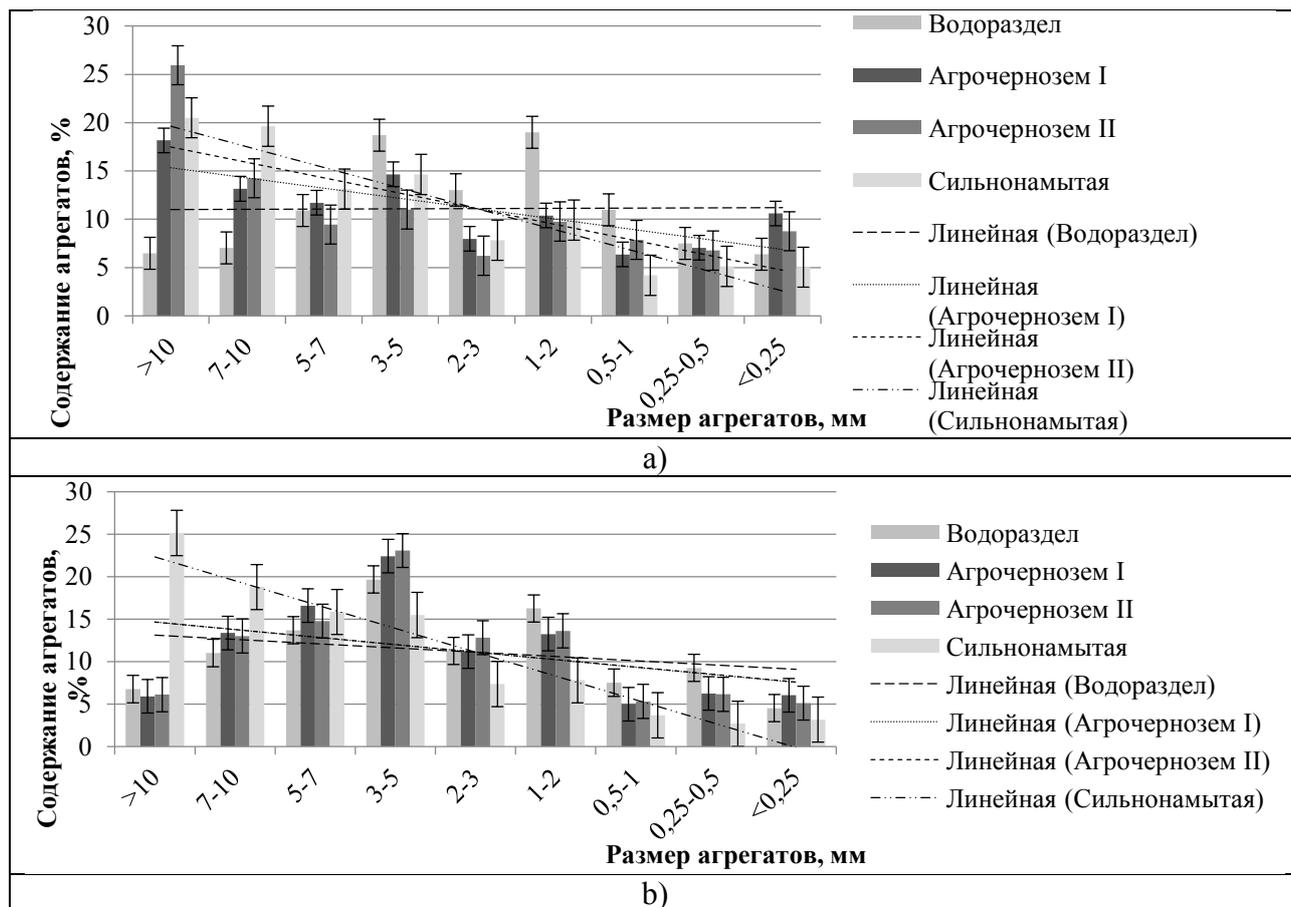


Рис. 1. Динамика структурно-агрегатного состава почвы, %: а) $A_{\text{пах}}$ б) $A_{\text{подпах}}$

Fig. 1. Dynamics of the structural and aggregate composition of the soil, %: а) $A_{\text{пах}}$ б) $A_{\text{подпах}}$

При выявлении главных компонент вычисляются собственные вектора и собственные значения на основе корреляционной матрицы с использованием исходных данных. Первичные данные имели разную размерность, а в результате преобразований были получены третьи значения, позволяющие сравнивать между собой полученные значения. Анализ параметров почвенного плодородия проводили на основании результатов обследования почвенных разрезов на агрохимические и агрофизические свойства (Холодов и др., 2016).

На первом этапе анализа главных компонент определили минимальное число факторов, которые вносят максимальный вклад в дисперсию переменных. Простота фактора определяется дисперсией квадратов, его нагрузки близки к нулю или единице, то есть он описывается наиболее просто и поэтому его можно наилучшим образом интерпретировать.



Первые четыре ГК описывают 83,0% в общей дисперсии всех изучаемых случаев. Остальные главные компоненты вносят несущественный вклад в общую дисперсию и их можно не рассматривать (таблица 2).

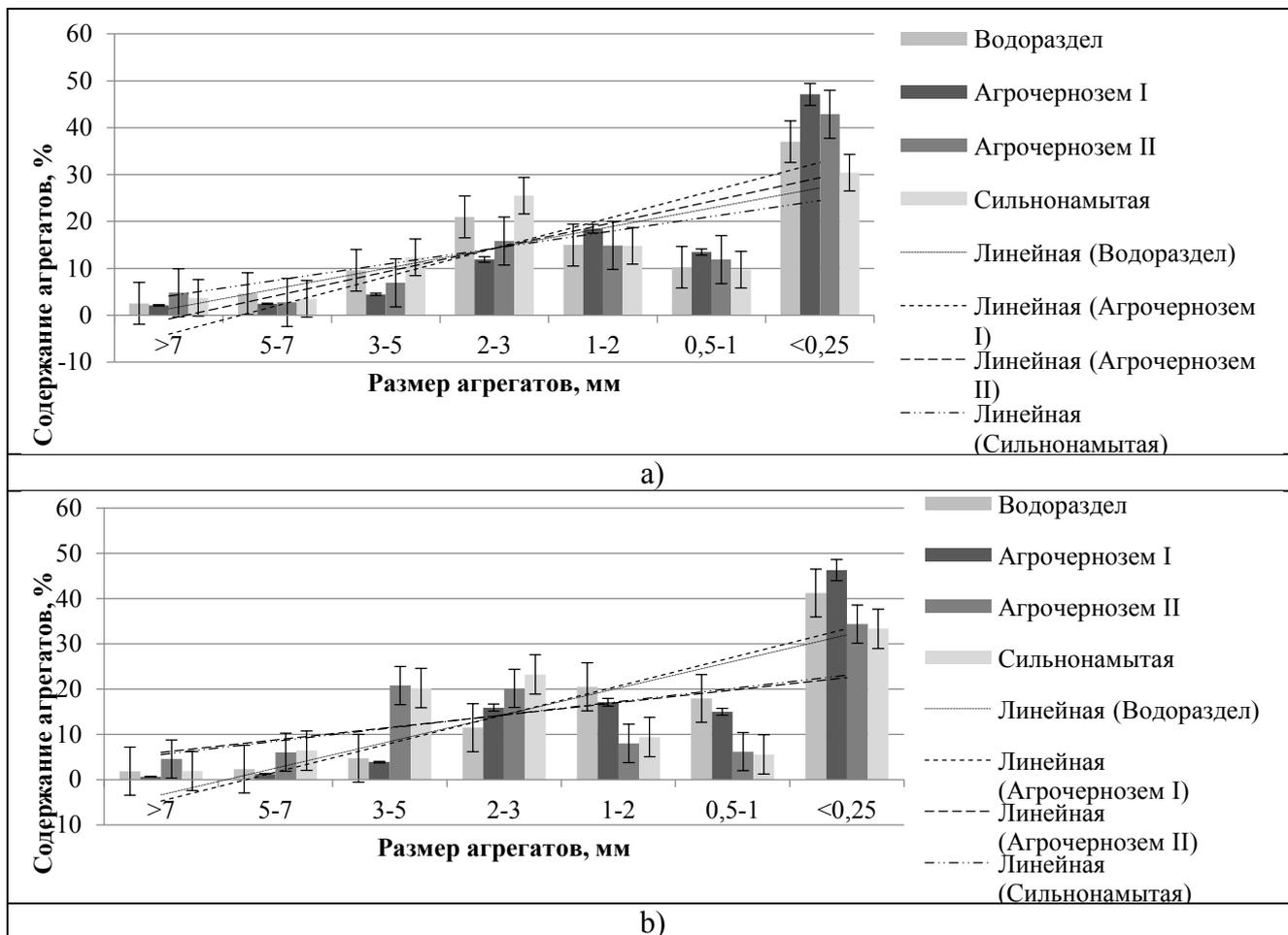


Рис. 2. Динамика содержания водоустойчивых агрегатов, %: а) А_{пах} б) А_{подпах}

Количество общих факторов или главных компонент заранее не известно. Общие и индивидуальные главные компоненты являются латентными, их значение невозможно измерить непосредственно. Задачами анализа главных компонент являются: сокращения числа переменных и определение структуры взаимосвязей между переменными, т.е. классификация переменных. Отметим, что новый фактор в действительности является линейной комбинацией нескольких исходных переменных. Можно определить статистическую значимость собственных значений и выделить статистически значимые факторы.

Главным условием для выделения главных компонент являются первичные собственные значения больше единицы. Остальные компоненты, имеющие бесконечно малые значения, при анализе не учитывали. Как можно видеть из таблицы, первый фактор (ГК-1) объясняет третью часть (31,7%) общей дисперсии, второй фактор – 25,3%, третий и четвертый – 17,5% и 8,6%, а все четыре фактора объясняют 83,0% всех взаимодействий.



Таблица 2. Собственные значения главных компонент

Главные компоненты	Собственные значения	Общая дисперсия, %	Кумулятивные собственные значения	Кумулятивный, %
1	7,0	31,7	7,0	31,7
2	5,6	25,3	12,5	56,9
3	3,9	17,5	16,4	74,5
4	1,9	8,6	18,3	83,0
5...15	1,2...0,0	5,5...0,0	19,5...22,0	88,6...100,0

Факторные координаты или факторные нагрузки переменных показывают силу связи с фактором. Для этого рассматривали корреляцию между переменными и первыми четырьмя факторами, эти корреляции называются факторными нагрузками. Коэффициент с высокими абсолютными значениями показывает, что фактор и переменная имеют тесную взаимосвязь. Для интерпретации факторов были определены переменные, которые имеют высокие значения нагрузок по одному и тому же фактору.

Первый фактор или ГК1 отражает связь между агрофизическими и агрохимическими свойствами почвы. По первой ГК были отобраны факторные нагрузки с весовыми коэффициентами, значения которых были больше 0,6–0,8. Сюда были отнесены большинство агрегатов различной размерности при просеивании на воздухе, содержание гумуса и элементов питания в почве. Здесь наблюдается общая закономерность, при уменьшении количества агрегатов крупного размера (5–10 мм) увеличивается количество агрегатов мелкого размера и пылевой фракции, полученных в результате просеивания, как на воздухе, так и в воде (таблица 3).

Так, первый фактор условно можно охарактеризовать, как отвечающий за жизнедеятельность растений и создающий, оптимальные условия в первые фазы их развития. Он объединяет в себе наиболее значимые параметры для формирования урожая, которые создаются при обработке почвы, это – создание оптимальной почвенной структуры (1–0,25 мм – (0,83–0,81); <0,25 мм – (0,66); 5–10 мм – (-0,70–(-0,67))) и наличие в почве основных элементов питания (K₂O (0,78); N-NH₄ (0,77); P₂O₅ (0,73); N-NO₃ (0,68) и Сорг (0,61)), необходимых для стартового роста растений. По-видимому, вышеперечисленные макроэлементы и органический углерод имеют наибольшее сродство с фракциями почвы размером 1–0,25 мм и водоустойчивыми агрегатами размерностью 0,5–0,25 мм и <0,25 мм.

Таблица 3. Матрица факторных координат переменных на основе корреляций

№ п/п	Переменная	Главные компоненты			
		1	2	3	4
1.	1–0,5с*	0,83	-0,18	-0,23	-0,07
2.	0,5–0,25с	0,81	-0,24	0,12	-0,24
3.	K ₂ O	0,78	0,22	-0,43	0,17
4.	N-NH ₄	0,77	0,49	-0,38	0,07
5.	P ₂ O ₅	0,73	0,39	-0,02	0,25
6.	7–5с	-0,70	-0,02	-0,24	-0,34
7.	N-NO ₃	0,68	0,07	-0,57	0,12
8.	10–7с	-0,67	0,55	0,26	0,13
9.	<0,25с	0,66	0,33	0,30	-0,27



10.	3–1ву**	-0,64	-0,24	-0,47	0,28
11.	C _{орг}	0,61	0,41	-0,45	0,05
12.	<0,25ву	0,60	0,03	0,57	-0,37
13.	0,5–0,25ву	0,58	-0,44	0,51	0,01
14.	3–2с	0,02	-0,84	-0,49	-0,12
15.	2–1с	0,42	-0,79	-0,40	-0,02
16.	>7ву	0,19	0,71	-0,12	-0,22
17.	>10с	-0,09	0,71	0,47	0,45
18.	5–3с	-0,28	-0,70	-0,48	-0,36
19.	7–5ву	0,01	0,69	-0,59	-0,19
20.	5–3ву	-0,42	0,68	-0,46	-0,27
21.	1–0,5ву	0,31	-0,64	0,49	0,42
22.	pH	0,07	0,15	0,51	-0,78

Примечание: * фракции агрегатов, полученные просеиванием на воздухе, мм;

** фракции водоустойчивых агрегатов, мм.

На вторую ГК2 приходится 25,3% от общей дисперсии, и ее условно можно назвать агрофизические показатели. Она также характеризует равновесие почвенной структуры, отражающееся в процессах распада и образования агрегатов. Наибольшие факторные нагрузки по ГК2 имеют такие показатели как макроагрегаты >10 (0,71) и фракции 1–3 мм с противоположным знаком (-0,79–(-0,84)), что отражает обратную зависимость: при образовании одних агрегатов, разрушаются другие. Аналогичная динамика образования-распада отмечена у водоустойчивых агрегатов размером >7 мм (0,71); 3–7 мм (0,68–0,69) и 1–0,5 мм (-0,64).

На третью (ГК3) и четвертую (ГК4) компоненты приходится только 17,5–8,6% от общей дисперсии, и она показывает связь между физико-химическими свойствами почвы и pH (-0,78).

Эти данные отображены на «круге корреляций» факторных координат переменных и наблюдений (рис. 3).

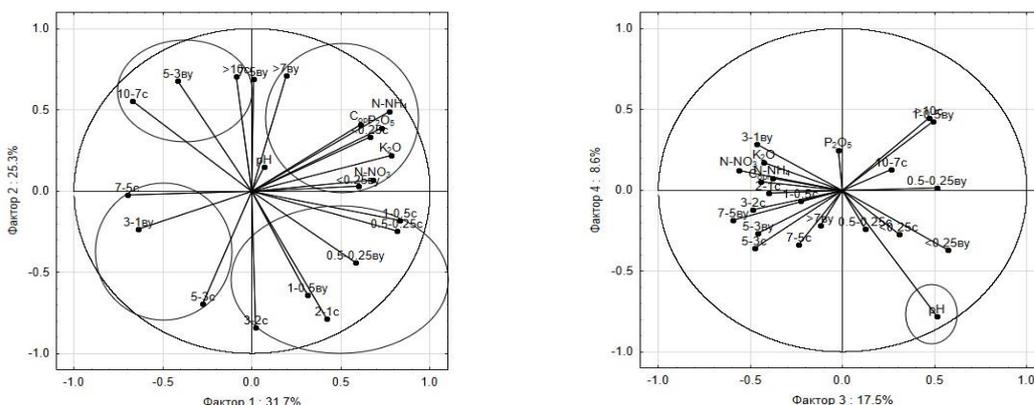


Рис. 3. Факторные нагрузки главных компонент ГК 1x2 и ГК 3x4 основных агрохимических и агрофизический показателей чернозема обыкновенного

Близкое расположение переменной к единичной окружности, показывает ее лучше отображение в новой системе координат для первых четырех главных компонент. Из графика видно, что наибольшие факторные нагрузки приходятся на первые две ГК 1 и ГК 2. Большинство факторных нагрузок имеет значения близкие к 1 и расположены близко к



окружности. Напротив, ГК 3 и ГК 4 находятся на значительном расстоянии от окружности, что говорит о меньшей общности или доли объясненной дисперсии, характеризующей степень общности переменной с другими переменными по заданному числу факторов.

Как было ранее отмечено ГК1, условно отражающая связь между агрофизическими и агрохимическими свойствами почвы и все показатели, характеризующие химические свойства почвы расположены в положительной области координат. Здесь же находится и большинство агрегатов более мелкого размера. Напротив, крупно глыбистые частицы и мезо агрегаты находятся в отрицательной области координат, что показывает обратную направленность процесса. Вторая ГК выявляет связь внутри агрофизических свойств почвы. Здесь также выявляется обратная связь с уменьшением крупно глыбистых фракций, увеличивается количество более мелких и пылеватых частиц. Третья ГК и четвертая ГК описывает связь между рН различными агрегатами почвы.

На рис. 4 показано расположение вариации признаков в двумерном пространстве координат ГК1 и ГК2, из которого видно, что все варианты хорошо распределены в выбранной системе координат (рис. 4). Близкие по свойствам почвы, находятся на графике относительно близко друг к другу, что говорит об их родстве. Генетические горизонты чернозема водораздела расположены относительно компактно и близко к осям системы координат, что указывает на общие или схожие агрофизические и агрохимические свойства почвы. Напротив, горизонты сильнонамытой почвы занимают в системе координат крайние позиции относительно осей координат, это подтверждает значительную разницу в свойствах пахотного (0–30 см), подпахотного (30–40 см) и более глубоких горизонтов (50–160 см). По-видимому, в более глубоких горизонтах почвообразовательные процессы протекают значительно слабее и эти горизонты располагаются в области отрицательных значений и по ГК1 и ГК2, тогда как пахотный и подпахотный горизонты расположены в области отрицательных значений только по ГК1. Выше мы отмечали, что ГК1 характеризует связь агрофизических и агрохимических свойств в почвы, а ГК2 – агрофизические свойства. По-видимому, в этой почве в силу отсутствия генетической связи с почвообразующей породой, обусловленной ее намытостью, нарушается равновесие в почвообразовательных и биохимических процессах.

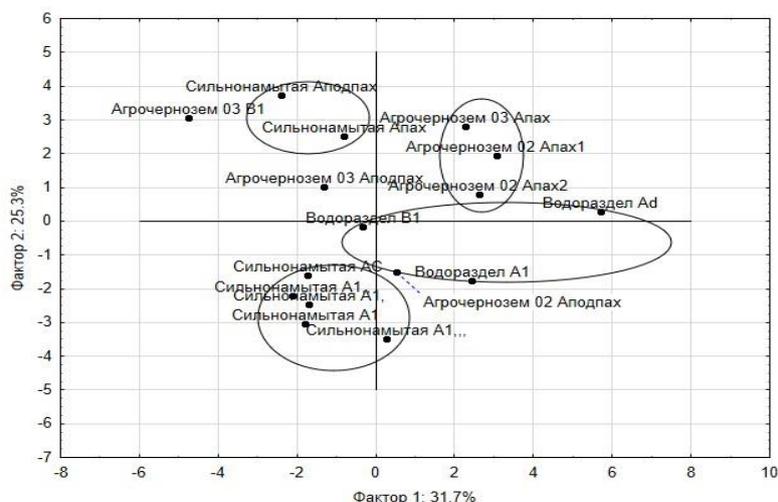


Рис.4. Расположение в пространстве первых двух главных компонент основных агрохимических и агрофизических показателей чернозема обыкновенного различного сельскохозяйственного использования: чернозем под лесной полосой на водоразделе, агрочерноземы, дерново-сильнонамытая почва



В этой же области или близко к ней расположены и генетические горизонты (Аподпах и В1) агрочернозема 3, расположенного ниже по склону, и характеризующегося более мощным гумусовым профилем, чем агрочернозем 2, что, возможно, свидетельствует о смыто-намытом генезисе этих горизонтов. Пахотные горизонты двух изучаемых агрочерноземов расположены в области положительных значений системы координат и генетически тяготеют к нативному чернозему (разрез 1).

Выводы

На основании распределения агрофизических и агрохимических показателей черноземов обыкновенных карбонатных в пространстве главных компонент, были выделены четыре ГК, описывающие 83,0% общей дисперсии. Первая главная компонента (ГК1) отражает связь между агрофизическими и агрохимическими свойствами почвы, выявляющую взаимозависимость между пылеватыми микроагрегатами, а также водоустойчивыми агрегатами размерностью 0,5–0,25 мм и <0,25 мм с одной стороны, и органическим углеродом, и элементами питания, с другой. Вторая ГК характеризует динамическое равновесие почвенной структуры, отражающееся в процессах распада и образования агрегатов, выраженное в обратной зависимости: при образовании агрегатов размером 1–3 мм, разрушаются макроагрегаты >10. Третья (ГК 3) и четвертая (ГК4) главные компоненты выявляют связь между физико-химическими свойствами почвы и рН.

Литература

- Артемьева З.С., Варламов Е.Б., Засухина Е.С., Цомаева Е.В., Когут Б.М. (2022) Органическое вещество водоустойчивых макро- и микроагрегатов чернозема типичного в контрастных вариантах землепользования. *Агрохимия*. **10**, 3–13.
- Гаевая Э.А., Безуглова О.С., Нежинская Е.Н. (2022) Агрофизические свойства чернозема обыкновенного слабоэродированного в длительном опыте в Ростовской области. *Почвоведение*, **11**, 1399–1414. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22110053>,
- Салихов Т.К., Елюбаев С.З., Бижон И.В. (2023) Почвенные агрегаты, пути их формирования и влияние воздействия антропогенных факторов на структуру почвенного покрова. *Биосферное хозяйство: теория и практика*. **1 (54)**, 49–54.
- Тагивердиев С.С., Безуглова О.С., Горбов С.Н., Сальник Н.В. (2022) О локализации углерода в структурных фракциях черноземов и урбостратоземов. *Живые и биокосные системы*, **42**.
- Ушаков Р.Н., Ушакова Т.Ю., Ручкина А.В., Головина Н.А., Кузнецова К.В., Бобраков Ф.Ю. (2021) Использование метода главных компонент и кластерного анализа для диагностики плодородия агросерой почвы. *Плодородие*. **6 (123)**, 26–29.
- Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Лазарев В.И., Фрид А.С. (2016) Интерпретация данных агрегатного состава типичных черноземов разного вида использования методами кластерного анализа и главных компонент. *Почвоведение*, **9**, 1093–1100.
- StatSoft, Inc. STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 13. 2020. Available online: <https://web.archive.org/web/20131213145004/http://statsoft.ru/> (дата обращения 1 марта 2024 г.).



SEAWATER INTRUSION IN COASTAL AQUIFER FROM RATNAGIRI AREA, INDIA AND ITS IMPACT ON QUALITY OF IRRIGATION WATER

Golekar Rushikesh Baburao, Dakve Soham Mahendra, Kurdhundkar Shubham Shailesh, Nivate Sanjana Sanjay

Department of Geology, G. B. Tatha Tatyasaheb Khare Commerce, Parvatibai Gurupad Dhere Arts and Shri. Mahesh Janardan Bhosale Science College, Guhagar, District Ratnagiri, Maharashtra (India) 415703
rbgolekar@gmail.com

Abstract: An attempt has been made in this work to determine the groundwater quality in parts of Guhagar area of Ratnagiri district, Maharashtra. Totally twenty-five groundwater samples were collected from dug and bore wells, during the winter season (January, 2023) and its physicochemical parameters like pH, EC and TDS, in order to understand the hydro-geochemistry of the water. Suitability of this water for its utility was verified using Indian standards. The analytical results of the groundwater samples showed that the average value is 6.60 and EC average value is 431.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ while TDS average values is 215.1 mg/L. The effect of sea water on the fresh water aquifer in this coastal region needs special attention in terms of monitoring and sustainable management. Besides, suitability of water for irrigation is evaluated based on this physicochemical parameter. Also, the suitable crop cultivation is recommended on the basis of quality of irrigation water.

Keyword: Groundwater, sea water, crops, irrigation, sustainable management.

Introduction

Coastal aquifers are important source of freshwater supply in coastal regions. Excessive groundwater extraction has led to seawater intrusion and water quality degradation in many coastal aquifers (Bear et al., 1999; Saxena et al., 2003; Mondal et al. 2010, 2011). The salinization of coastal aquifers will deteriorate with the increasing demands for freshwater resources in coastal areas and predicted international sea level rise by 0.1 m to 2 m before 2100 (Pfeffer et al., 2008). Better understanding of seawater intrusion in coastal aquifers and the ability to more precisely prediction of the extent of aquifer salinization is very important for improving water resources planning, development and management in coastal areas. Seawater intrusion in a coastal aquifer is a natural phenomenon that occurs due to flow and salt transportation driven by the density variation between the seawater and fresh groundwater. The seawater intrusion is increased by groundwater extraction and potentially sea level rise as these processes reduces the hydraulic gradient that drives fresh groundwater discharge in to the ocean (Werner and Simmons, 2009; Chang et al., 2011).

As a natural factor, the ocean tide has a greater impact on seawater intrusion (Kim et al., 2005). Therefore, it is essential to determine whether groundwater has been contaminated due to seawater intrusion in the coastal areas. Because domestic and irrigation source in coastal area is groundwater due to the inadequate geographical features. Groundwater quality is drastically decreasing due to seawater intrusion into groundwater. The present study was carried out to identify the seawater ingress in the Guhagar area of Ratnagiri District and its impact on groundwater quality. The main source of drinking water supply in the studied regions is groundwater except one small dam situated near Guhagar Town. Small rivers are flowing in this area but during the dry seasons the most of the rivers were dried. In this situation, water quality assessment and the study of hydrogeochemical processes affecting the groundwater quality in coastal areas will be helpful to promote sustainable development and the management of water resources.

The aim of present study is to assess the groundwater quality and its deterioration in coastal aquifer in Guhagar area of Ratnagiri District, Maharashtra (India) by examining the



physicochemical characteristics. A total 25 wells have been selected for the purpose of water sampling in and around Guhagar Town. A total 25 water samples were collected from different zones from the during the winter season (January, 2023). Samples were analysed for its physicochemical parameters (i.e., pH, EC, TDS).

The study area is a coastal territory which lies between Guhagar Town in the South (Latitude 17.47 N to 17.51 N) and (Longitude 73.18 E to 73.19 E). The location map of the study area has depicted in Figure 1. The present study area is receiving rainfall from southwest monsoon during the period of June to September, July being the recipient of maximum rainfall. October and November months receive late showers from retreating monsoon. Such variation in rainfall has an important bearing on groundwater level fluctuations. The average annual rainfall of the Guhagar area is 2745 mm. The hottest month is May, its mean monthly temperature being 32.7°C and the coldest month is January, its mean monthly temperature being 18.6°C. The annual average evaporation is 158 mm. The maximum humidity of over 80% is experienced in the rainy months that seldom lower down to 60% due to proximity of sea. The data thus suggests that the area experiences per-humid to humid type of climate (IMD 1972; NBSS 1995; Uamrikar and Thigale, 2007).

Geologically study area is mostly covered by the basaltic lava flows of the Continental Tholeiitic Province of India (Deccan Volcanic Province), of the upper Cretaceous to Miocene Period. At a number of places, laterite cappings on basalt occur at various altitudes. The basalt is massive, compact and fine grained with occasional presence of vesicles. The Quaternary (Holocene) sediments were found along the coast. These sediments are found in consolidated and unconsolidated calcareous sands and contain molluscan shells in varying proportions. These sediments are fine grained to medium grained and rounded to sub rounded in character (Herlekar and Sukhatnkar, 2011). Beaches are represented by sand, spit by beach rock, flats by mud and uplifted abrasion platforms by colluvium and alluvium (Uamrikar and Thigale, 2007). Geological map of the study area is depicted in figure 2.

Hydrogeological environments in the study area are mostly found as unconfined aquifer system. Water bearing rock formation in the top section is more often weathered basalts while higher altitude areas usually have hard basalts. In general, the aquifer consists of weathered jointed and fractured basalts. Groundwater level in the study areas was shallow and some of the well's groundwater level below the mean sea level (Uamrikar and Thigale, 2007). In the field investigation, it was found that total depth of the wells is shallow and it is around 16 meters below ground level (bgl). According to the results, there is a clear variation of the groundwater table during dry and wet seasons. Elevation of the groundwater table varies from 2 to 7 m above the mean sea level (m. amsl) in the study area.

Objects and methods

1. To find the groundwater level of the wells from the study area.
2. To determine the pH, conductivity and total dissolved solids from groundwater samples.
3. To determine the impact of quality of water on productivity of the crops.
4. To recommend and suggestive measures to control and overcome the salinity hazard problem in the area.



Sampling and chemical analysis

Total 25 wells locations have been fixed for water sampling and depicted in Table 1 along with its co-ordinates. For the purpose of present study, a total of 25 water samples were collected from different location in Guhagar town, Ratnagiri District, Maharashtra (India). The samplings have been carried out on in the month of January 2023. In this regard, it is difficult to specify the exact sampling depth so that we assumed groundwater samples are mixed over the whole vertical section where wells are selected as sampling sites (James, 2020). Representative well location has depicted in field photographs number 01 and 02. The analysis of the influence of seawater on the groundwater quality was based on physicochemical parameters such as electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS) and pH. The pH measured with a with pH meter (Hach), the EC and TDS measured on EC meter.

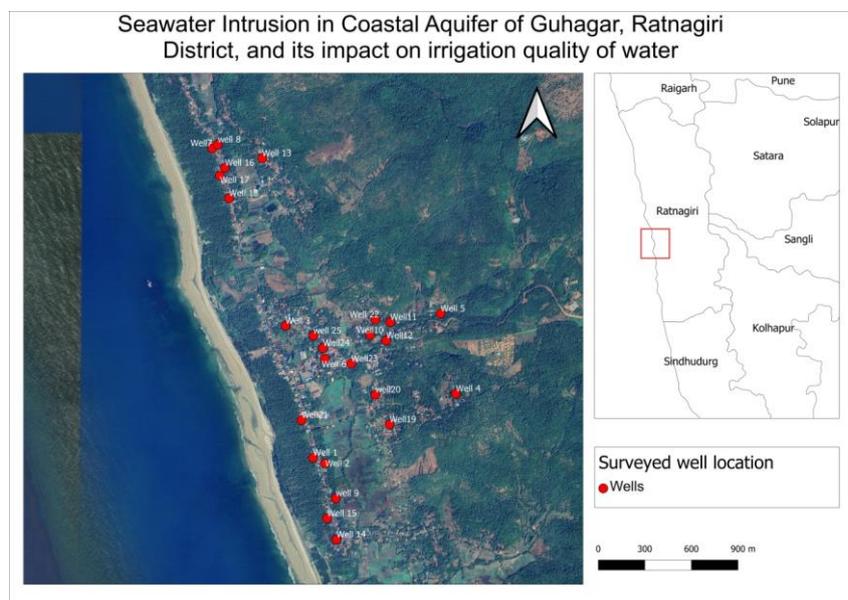


Fig. 1. Location map of the study area

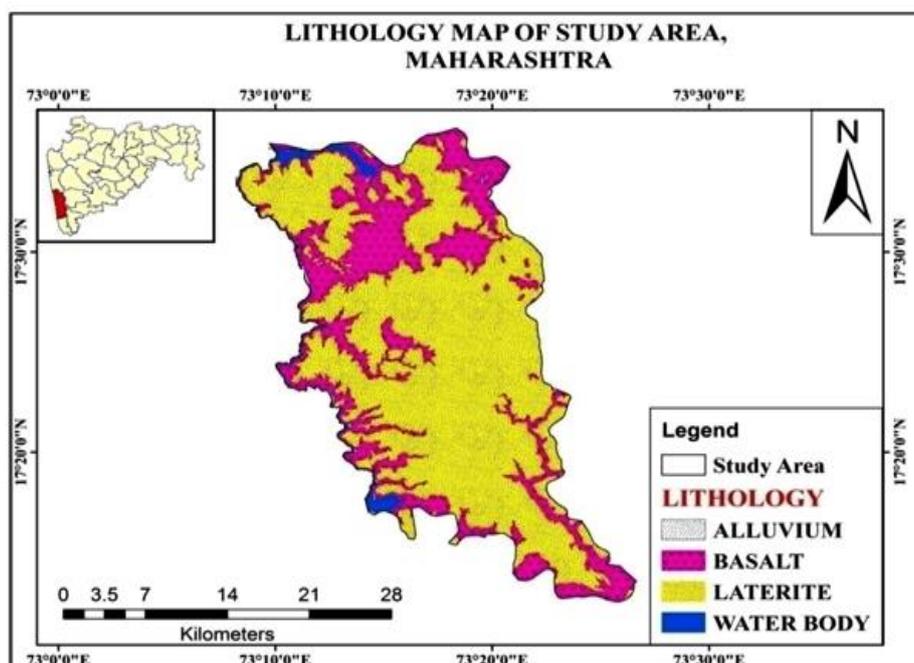
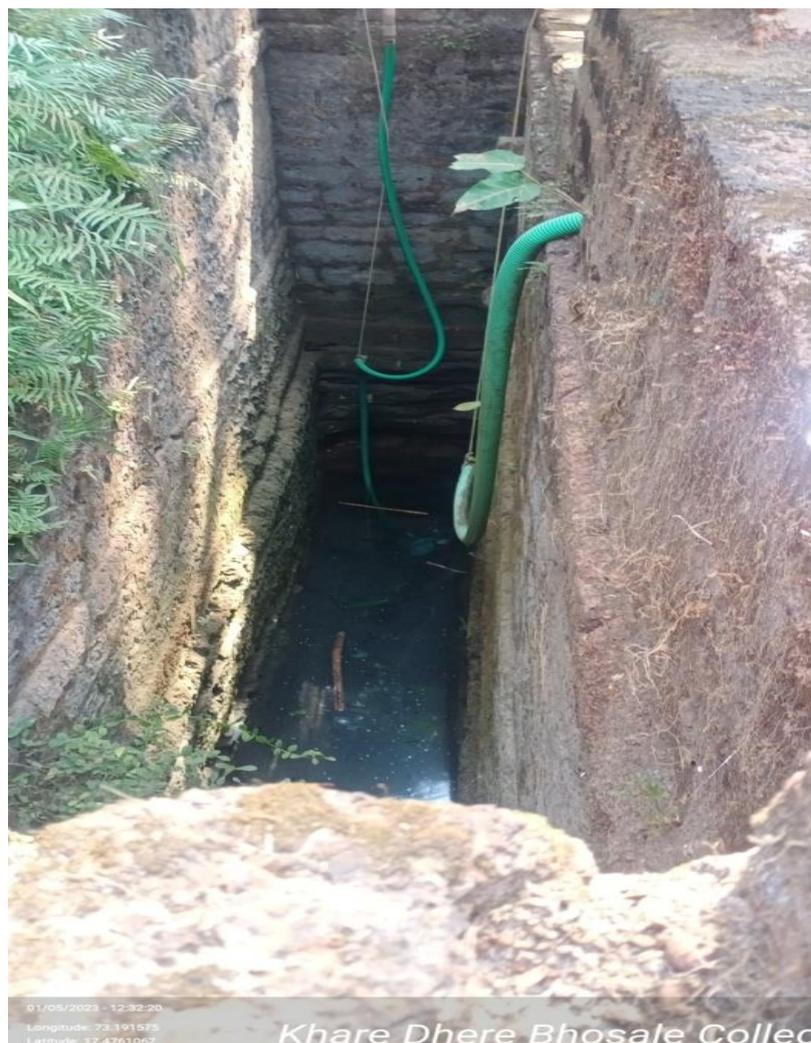


Fig. 2. Geological map of the study area



Field photograph 1. (Well Number 09)



Field photograph 2. (Well Number 18)



Results and discussion

Hydrochemical characterization

All analytical results of the water samples from the study area are depicted in Table 1. Obtained results of water quality parameters have been compared with Bureau of Indian Standards (BIS) for drinking water. The analytical results of the groundwater samples showed that pH ranges from 5.77 to 7.33 with an average value is 6.60 (Fig. 3). EC was found ranged from 95 to 997 $\mu\text{S}/\text{cm}$ with an average value is 431.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 4). TDS concentration ranges between 48 and 481 mg/L with average of 215.1 mg/L (Table 2).

The pH of groundwater sample measures its hydrogen ion concentration and indicates whether the sample is acidic, neutral or basic. Majority of the groundwater samples from the study area shows acidic and neutral nature. This suggests that this category of water where the pH values ranged between 5.0 to 8.0 is most suitable for cultivation of betel nut (George and Robert, 2006). Detay and Carpenter (1997) has been categorized drinking water based on values of electrical conductivity which shows level of mineralization (Table 2). According to this classification majority of groundwater samples from the study area falls under weakly and slightly mineralized water category.

Salinity hazards

Electrical conductivity depends on water's capacity to convey an electric current, which is used for indicating the total concentration of ionized constituents present in natural water. Electrical conductivity is a good measurement of salinity hazard to crops as it reflects the TDS in groundwater. Salts in soil or water reduce water availability to the crop to such an extent that yield is affected. A salinity problem exists if salt accumulates in the crop root zone to a concentration that causes a loss in yield. In irrigated areas, these salts often originate from a saline, high water table or from salts in the applied water. Yield reductions occur when the salts accumulate in the root zone to such an extent that the crop is no longer able to extract sufficient water from the salty soil solution, resulting in a water stress for a significant period of time. If water uptake is appreciably reduced, the plant slows its rate of growth. The plant symptoms are similar in appearance to those of drought, such as wilting, or a darker, bluish-green colour and sometimes thicker, waxier leaves. Symptoms vary with the growth stage, being more noticeable if the salts affect the plant during the early stages of growth. In some cases, mild salt effects may go entirely unnoticed because of a uniform reduction in growth across an entire field. Salts that contribute to a salinity problem are water soluble and readily transported by water. A portion of the salts that accumulate from prior irrigations can be moved (leached) below the rooting depth if more irrigation water infiltrates the soil than is used by the crop during the crop season. Leaching is the key to controlling a water quality-related salinity problem. Over a period of time, salt removal by leaching must equal or exceed the salt additions from the applied water to prevent salt building up to a damaging concentration. The amount of leaching required is dependent upon the irrigation water quality and the salinity tolerance of the crop grown.



Table 1. Details of the selected well for the present study along with analytical results
(Latitude and longitude values in decimals of degree minutes)

Well Number	Latitude	Longitude	Depth of Well (m)	Diameter of well (m)	Water level (m bgl)	pH	Electrical Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Total Dissolved Solids (mg/L)	Use of well water	Lithology
1	17.48	73.19	12	3.7	1.4	6.42	235	122	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
2	17.48	73.19	10	3	1.4	6.11	226	111	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
3	17.48	73.19	11	3.5	2	6.26	240	123	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
4	17.48	73.19	16	2.4	4	6.39	232	115	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
5	17.48	73.19	12	2.8	3.3	6.12	180	89	Domestic use	Lateritic Soil, Compact Basalt
6	17.48	73.19	10	2.7	2.9	6.6	489	240	Not used	Lateritic Soil, Compact Basalt
7	17.48	73.19	7	3	1	6.49	206	102	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
8	17.48	73.19	7	3	4	6.37	322	160	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
9	17.49	73.18	8	3	1.8	6.5	251	127	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
10	17.49	73.18	8	4	2	6.2	287	142	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
11	17.49	73.18	8	2.7	4	7.02	856	450	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
12	17.47	73.19	6	3.3	4.4	7.23	828	412	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
13	17.47	73.19	5	3.4	4.4	6.94	784	387	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
14	17.48	73.18	5	3.3	3.4	6.99	604	311	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
15	17.47	73.19	7	1.5	4.4	7.06	597	294	Coconut, betel nut	Unconsolidated Siltstone
16	17.47	73.19	5	3.2	2.7	7.33	361	183	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
17	17.47	73.19	5	2.5	5.6	6.83	702	344	Coconut, betel nut	Unconsolidated Siltstone
18	17.47	73.19	7	2	4.9	7.11	589	298	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
19	17.48	73.19	6	3	2.2	6.23	283	142	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
20	17.48	73.18	7	2.9	5.2	5.78	95	48	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
21	17.48	73.18	9	2.5	6.5	5.77	146	74	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
22	17.51	73.18	4	2.8	2	7.25	997	481	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
23	17.51	73.18	7	2.5	4.5	6.99	698	341	Coconut, betel nut	Unconsolidated Siltstone
24	17.49	73.18	6	3	3.5	6.57	374	186	Coconut, betel nut	Lateritic Soil, Compact Basalt
25	17.48	73.19	11	6.5	5	6.48	196	97	Coconut, betel nut	Jointed Basalt



Table 2. Relation between water conductivity and mineralization
(After Deday and Carpenter, 1997)

EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Mineralization	Number of samples	% of samples
< 100	Very weakly mineralized water	1	4
100-200	Weakly mineralized water	3	12
200-400	Slightly mineralized water	11	44
400-600	Moderately mineralized water	3	12
600-1000	Highly mineralized water	7	28
> 1000	Excessively mineralized water	Nil	Nil

Relationship of quality of water on productivity of the crops

The study area renowned for cultivation of coconut trees, betel nut and mango trees. In the present study we analysed pH, conductivity and Total dissolved solids in groundwater samples from 25 selected wells from Guhagar Town. The Betel nut plants in many types of soils varying in texture from laterite to loamy. Also, betel nut plants prefer soil with medium texture and sandy clay and loamy soils. And also needs high moisture retains. The pH of the soil for betel nut is in range from 5.0 to 8.0 is good for better crops yields. Betel nut is also not salt tolerant so need low saline soil for better crop yield. Betel nut crops not sustaining in waterlogged soil. The obtained results from the study area suggest that pH of water samples from the study area is good for betel nut plants. Field survey proven that the betel nut from the stud area is very healthy and it will be high yield. This suggests that the study area is most feasible for cultivation of betel nut where the pH of irrigation water is ranged from 5.00 to 8.00.

Proper supply of moisture either through well distributed rainfall or irrigation and sufficient drainage are essential for coconut. Coconut can be grown in soil with pH of 5.2 - 8.6. The obtained results from the study area suggest that pH of water samples from the study area is good for coconut nut plants. The coconut crop is better good crop yield if supply of saline water. In the study area slightly, saline water is found in the well number 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 22 and 23. This well are mostly in unconsolidated sedimentary rock formation as well as near from the coast. This suggest that where is irrigation water is slightly saline recommend that for cultivation of coconut instead of betel nuts in this area. Mango grows well on wide variety of soils, such as lateritic, alluvial, sandy loam and sandy. The loamy, alluvial, well-drained, aerated and deep soils (2-2.5 m) rich in organic matter with a pH range of 5.5-7.5 are ideal for mango cultivation. The obtained results from the study area suggest that pH of water samples from the study area is good for Mango plants.

The electrical conductivity in the irrigation water above 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ can reduce the growth and quality of mango tree seedlings. Well number 11, 12 and 22 were found the beyond the permissible limit of electrical conductivity this suggest that this well water is unfavourable for the irrigation purpose for the mango as well as for betel nut because betel nut is not salinity tolerant and it leads to decrease the crop productivity of the mango as well as betel nuts. This well water



will be beneficial for cultivation of coconut instead of Mango and betel nuts because of mango is salt tolerant plants.

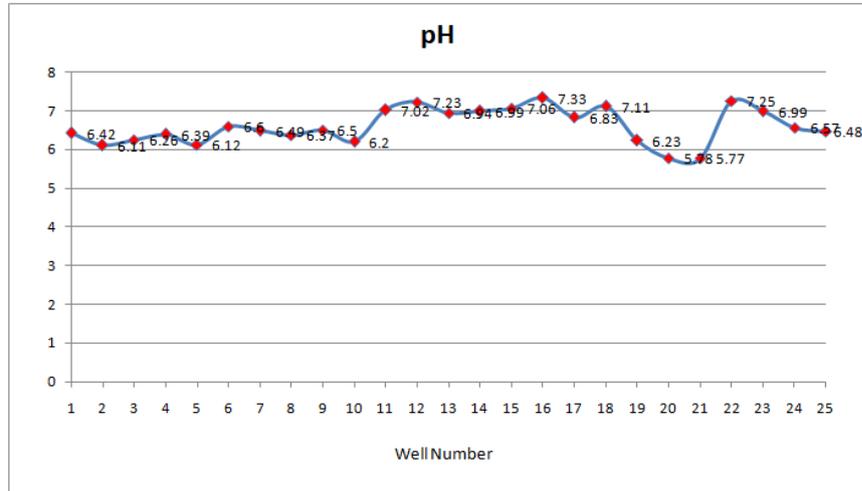


Fig. 3. pH in water samples from the study area

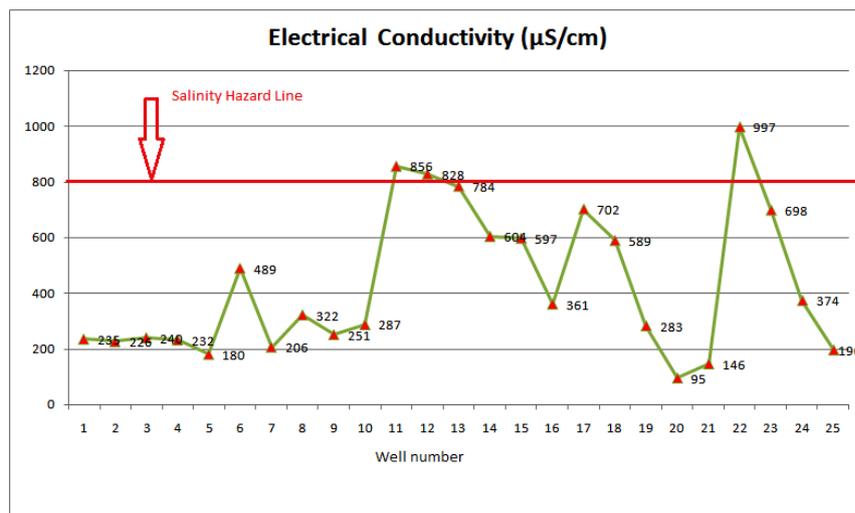


Fig. 4. Electrical conductivity of water samples from the study area

Significant field observations

1. Excavation of hills in the study region which is proven that the decreasing plantation and increasing urabanisation which leads to decline the groundwater recharge and ultimately effect the water quality in terms salinity (Field photograph 3).
2. Speedily conversion of forest land into non-agricultural land it will be decrease the recharge rate of rainwater in the study area and ultimately it will increase the salinity of groundwater (Field photograph 4).
3. Healthy plants of betel nuts in the area under study which reflect that the good quality of water (Field photographs 5).
4. Non cultivation of rice crops in the surrounding areas of the well which will ultimately decrease the recharge rate of rainwater in the area and ultimately it will increase the salinity of groundwater due to declining the dilution factor (Field photograph 6).



Field Photograph 3. Excavation of topsoils in the study area which prove the decreasing the planation and increase urbanisation which lead to decrease the groundwater recharge which will effect the quality of water in terms of increase the salinity ingress in natural



Field Photograph 4. Speedily conversion of forest and barren land into non-agricultural land it will be decrease the recharge rate of rainwater in the area and ultimately it will increase the salinity of groundwater due to declining the dilution factor



Field Photograph 5. Healthy plants of betel nuts in the area under study which reflect that the good quality of water



Field Photograph 6. Non cultivation of rice crops surrounding areas of the well which will ultimately decrease the recharge rate of rainwater in the area and ultimately it will vulnerable to increase the salinity of groundwater

Conclusions

This work is demonstrated the hydro-geochemical characteristics of coastal aquifers of Guhagar area of Ratnagiri District in the State of Maharashtra from India. The overexploitation of the coastal aquifers is allowed the salinization process at a faster rate and therefore affected the quality of soil and growth of plants and crops. Therefore, it is essential to have successful conservation and well managed plan to protect the coastal aquifers of this region from salinization process. Few conventional methods have been recommended for conservation and protection of the coastal aquifers of this region from salinization process. Reduction of pumping from wells is the simplest, direct and cost-effective method to maintain the groundwater balance in aquifers. New varieties of salinity tolerant crops should be introduced for cultivation in these areas. It is also needs to change the cropping patterns. Most of the farms are empty after harvesting of Kharif (Monsoon) crops and therefore, needs to Rabbi (winter) crops should be cultivated based on suitability of local climate and soil types.

Acknowledgment

Authors acknowledged to the IIT Bombay for encourage the college students to carry out project work under the scheme of Unnat Maharashtra Abhiyan. Authors also acknowledges to the Principal, Khare Dhare Bhosale College Guhagar for official support during the completion of this research work.

References

- Werner , A.D., Simmons, C.T. (2009) Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers. *Ground Water*. **47 (2)**:197-204.
- Bear, J., Cheng AHD, Sorek S., Ouazar, D., Herrera, I. (1999) Seawater intrusion in coastal aquifers: concepts, methods and practices. *Theory and Applications of Transport in Porous Media*. **14**. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 625.
- BIS (2003) Drinking Water Standards (IS: 10500 91 revised 2003)
- Chang C-K, Hayes RD, Perera G, Broadbent MTM, Fernandes AC, Lee WE, et al. (2011) Life Expectancy at Birth for People with Serious Mental Illness and Other Major Disorders from a Secondary Mental Health Care Case Register in London. *PLoS ONE* **6 (5)**: e19590. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019590>
- Detay M, Carpenter M (1997) Water wells: implementation, maintenance and restoration. *Wiley*, London.
- Herlekar M. A. and Sukhtankar R. K. (2011) Morphotectonic Studies along the Part of Maharashtra Coast, India. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. **04**, pp. 61-83
- Indian Meteorological Department (1972) Climate of Maharashtra. Govt of India Publication, Pune, 114p.

- James G. Speight, Remediation technologies, Editor(s): James G. Speight, Natural Water Remediation, Butterworth-Heinemann (2020) pp. 263-303.
- Kim, J.H.; Lee, J.H.; Cheong, T.J.; Kim, R.H.; Koh, D.C.; Ryu, J.S.; Chang, H.W. (2005) Use of time series analysis for the identification of tidal effect on groundwater in the coastal area of Kimje, Korea. *J. Hydrol.*, **300**, 188–198.
- NATIONAL BUREAU OF SOILS SURVEY (1995) Soils of Maharashtra for optimizing land use. Soils of India Series-5,9 p.
- Umarikar Bhavana and Thigale S. S. (2007) Sea Water Ingress Study Along the Guhagar Coast of Maharashtra with Reference to the Harmonious Water Resource Development. *Journal Geological Society of India*. **69**, 933-942
- Pfeffer, W.T., Harper, J.T., O'Neel, S. (2008) Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st Century Sea-Level Rise. *Science*. **321**, pp. 1340-1343.
- Mondal, N.C., Singh, V.P., Singh, V.S. and Saxena, V.K. (2010). Determining the interaction between groundwater and saline water through groundwater major ions chemistry. *J. Hydrol.*, **388** (1-2), 100-111.
- Mondal, N.C., Singh, V.P., Singh, S. and Singh, V.S. (2011). Hydrochemical characteristic of coastal aquifer from Tuticorin, Tamil Nadu, India. *Environ Monit Assess*, **175** (1-4), 531-550.
- Saxena, V.K., Singh, V.S., Mondal, N.C. and Jain, S.C., (2003). Use of hydro-chemical parameters for the identification of fresh groundwater resources, Potharlanka Island, India, *Environ Geol*, **44** (5), 516-521.

УДК 631.4:504.53

ТВЕРДЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ВЫПАДЕНИЯ КАК ИСТОЧНИК ГИДРОФОБНОСТИ ГОРОДСКИХ ПОЧВ (МОДЕЛЬНЫЙ ОПЫТ)

Гончаров Н.В.¹, Прокофьева Т.В.¹, Федотов Г.Н.¹, Потапов Д.И.

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
goncharov7991@gmail.com

ATMOSPHERIC SOLID FALLOUTS AS A SOURCE OF HYDROPHOBICITY OF URBAN SOILS
(A MODEL EXPERIMENT)

Goncharov N.V.¹, Prokofieva T.V.¹, Fedotov G.N.¹, Potapov D.I.¹

¹Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: The water-repellent properties of Albeluvisols in the urban conditions was modeled. With an increase in the amount of urban dust in the soil material, the level of its hydrophobicity also increases. Results of this experiment indicates a significant impact of solid atmospheric fallouts on urban soil water-repellent properties.

Введение

В городских условиях физические свойства почв меняются вследствие ряда антропогенных факторов: увеличение запечатанности территорий, снижение озелененности, захламление поверхности, переуплотнение корнеобитаемого слоя, нарушение теплового режима, поступление загрязняющих веществ из атмосферы (Почва, город, экология, 1997). Тем не менее, водно-физические свойства очень важны для обеспечения благополучного существования растений. Водоотталкивающая способность, влияющая на водопроницаемость – одно из таких почвенных свойств.

Водоотталкивающая способность почв зависит от ряда факторов: гранулометрический состав, плотность, величина рН, содержание и состав почвенного органического вещества и др. (Архипова с соавт., 2007, Дымов А.А., Милановский Е.Ю., Холодов В.А., 2015, Daniel et al., 2019, Huang J., Hartemink A.E, 2020, Milanovskiy et al., 2015). В условиях городской среды к числу этих параметров добавляется аэральная нагрузка в виде твердых атмосферных выпадений (ТАВ), которые могут содержать компоненты, оказывающие влияние на гидрофобно-гидрофильные свойства.

В составе ТАВ обнаружены: тяжелые металлы (Ладонин Д.В., Михайлова А.П., 2020, Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E, 2020), первичные биологические аэрозольные частицы, в том числе условно патогенные и патогенные бактерии (Glushakova et al., 2021), выбросы промышленных предприятий (Таловская А.В., Язиков Е.Г., Беспалова А.И., 2021), полиароматические углеводороды (Zavgorodnyaya et al., 2019). В исследованиях, посвященных сопряженному

изучению городской пыли и почв, обнаружено сходство в концентрации тяжелых металлов (Ладонин Д.В., Михайлова А.П., 2020), составе микроорганизмов (Прокофьева с соавт., 2021) и других компонентов (Прокофьева с соавт., 2015), что может говорить об участии ТАВ в формировании поверхностных горизонтов почв (Prokof'eva et al., 2017).

Цель работы – смоделировать процесс гидрофобизации почв в условиях мегаполиса, оценить его скорость и подтвердить гипотезу о том, что материал пылевых выпадений оказывает влияние на свойства поверхностных горизонтов городских почв.

Объекты и методы

Объекты

В качестве исходного субстрата для постановки модельного опыта были выбраны дерново-подзолистые почвы средне-тяжелосуглинистые (Dystric Albic Retisol (Loamic)) на покровных суглинках, подстилаемых мореной, отобранные из лесного массива около УОПЭЦ “Чашниково”. Данные почвы можно рассматривать как фоновые за пределами города (Участок 1).

Для исследования взаимосвязи между объемом пылевых выпадений и изменением гидрофобности был поставлен модельный опыт. Образец почвы для опыта был отобран из гумусово-аккумулятивного горизонта фоновой почвы в исходной влажности методом конверта. Было смоделировано загрязнение пылевыми выпадениями слоя почв в 10 см, так как именно в поверхностном слое почвы происходит наиболее активная зоотурбация (Захаров с соавт., 1989). После определения влажности и плотности образцов (Шейн Е.В., Карпачевский Л.О., 2007), исходя из среднегодовой аэральная нагрузка в г. Москве в 32.85 г/м² в год (Самаев С.Б., Морозова И.А., Якубов Х.Г., 2001), были взяты объемы пыли, эквивалентные 10, 20, 30, 40, 50, 70, 80, 90, 100, 150, 200-летнему загрязнению. Навески почвы, просеянной через 2 мм сито, массой 30 г вручную перемешали с загрязнителем и довели до воздушно-сухого состояния. Для уплотнения и равномерного распределения пыли внутри образца использовали вибрацию. Для предотвращения процесса самосортировки почвенных частиц и агрегатов при вибровоздействии на поверхность образца перед включением вибростол помещали груз цилиндрической формы массой 900 г, имеющий диаметр, равный внутреннему диаметру (70 мм) чашки Петри. Использовали вибростол Renfert Vibrax. Уплотнение производили в течение 10 с, при частоте вибрации 50 Гц с использованием длинноволнового диапазона прибора на втором уровне интенсивности. Одну каплю дистиллированной воды (объем 0.046 мл) помещали на поверхность почвы с помощью бюретки на высоте около 10 мм. Время, затраченное на полное

проникновение капли, измеряли с помощью секундомера. Измерения проводили в десятикратной повторности.

Было поставлено 3 варианта опыта с 3 разными образцами городской пыли:
Пыль 1. Смёт с дорожных конструкций Третьего транспортного кольца (ТТК) в районе Кутузовского тоннеля (зимний образец 2021 г.);
Пыль 2. Смёт с дорожных конструкций Третьего транспортного кольца в районе площади Гагарина (летний образец 2022 г.);
Пыль 3. Смёт с элементов зданий прилегающих территорий вдоль Ленинского проспекта в районе парка “Нескучный сад” (зимний образец 2022 г.).

Также на территории Москвы были отобраны несколько образцов поверхностного горизонта почв с участков, имеющих разную степень техногенной нагрузки. Данные участки исследования отличаются по времени нахождения в городской черте и, следовательно, по длительности антропогенного воздействия. С другой стороны, они характеризуются разным типом функционального использования и разными типами почв. Участки исследования на территории города в порядке увеличения антропогенной нагрузки:

Участок 2. Алешкинский лес (центральная часть, смешанный лес), располагающийся в районе “Северное Тушино” на северо-западе Москвы. Почвы – дерново-подзолистые средне-тяжелосуглинистые (Dystric Albic Retisol (Loamic)) на покровных суглинках, подстилаемых мореной.

Участок 3. Алешкинский лес (восточная часть, мелколиственный лес). Почвы – постагрогенные дерново-подзолистые почвы (Dystric Albic Retisol (Aric, Loamic)). Данную территорию можно рассматривать как переходную между более естественной экосистемой Алешкинского леса и селитебными территориями города.

Участок 4 расположен на территории МГУ в Ботаническом саду на Воробьевых горах на участке культурных растений. В данном месте почва неоднократно удобрялась компостами, определена как рекреазем на техногенных отложениях (Endostagnic Phaeozem (Loamic, Relocatic, Organotransportic, Technic)), подстилаемых агродерново-подзолистой почвой на покровных суглинках.

Участок 5 расположен на перекрестке ул. Менделеевской и ул. Академика Хохлова, в непосредственной близости от Ботанического сада МГУ. Почвы участка представлены урбостратоземом (Urbic Technosol (Arenic Mulminovic Transportic)), стратифицированным слоем рекультиванта.

Участок 6 располагается на территории ИМГРЭ РАН на ул. Вересаева. Почвенный покров представлен маломощным урбостратоземом (Urbic Technosol (Loamic Transportic)), на техногенных отложениях, сформированных из турбированных и загрязненных строительно-бытовым мусором дерново-подзолистых почв с микрофрагментами морены. В парке на той же улице обнаружены дерново-подзолистые почвы на покровном суглинке.

Участок 7 приурочен к территории ИПЭЭ РАН, расположенной вдоль Ленинского проспекта. Почва – урбостратозем (Urbic Technosol (Calcaric Siltic Transportic)), на техногенном грунте.

Методы

Гидрофобность образцов, полученных в результате модельного опыта, а также образцов поверхностных горизонтов почв с участков исследования и образцов пыли, задействованной в эксперименте, была определена методом просачивания водной капли (WDPT-тест). В зависимости от времени проникновения водной капли почвы разделяют на следующие классы по степени гидрофобности (Bisdorn E.V.A., Dekker L.W., Schoute J.F.Th., 1993): смачиваемая (гидрофильная) – <5 с, слабогидрофобная – 5–60 с, умеренно-гидрофобная – 60–600 с, сильногидрофобная – 600–3600 с; чрезвычайно гидрофобная – > 3600 с.

Лабораторное определение концентрации нефтепродуктов проводили согласно ПНД Ф 16.1:2.21-98, массовой доли органического вещества – согласно ГОСТ 26213-91 (по Тюрину), рН водной вытяжки – согласно ГОСТ 26423-85, массовой доли кремния – по методике М-2 2016. Гранулометрический состав определяли с помощью метода лазерной дифракции. Модель лазерного анализатора размеров частиц – Microtrac Bluewave.

В качестве характеристики антропогенного воздействия использовался показатель объемной магнитной восприимчивости почв (ОМВ). ОМВ определялась при помощи каппаметра КТ-5 в соответствии с методикой Гладышевой и Иванова (Гладышева М.А., 2007) с некоторыми изменениями в размере площади обследования для получения более репрезентативных результатов. Полученные значения ОМВ помогли выстроить участки в ряд по возрастанию антропогенной нагрузки (табл. 1).

Статистическую обработку проводили с помощью программного пакета Statistica. Распределения были охарактеризованы диаграммами размаха, также называемыми “ящичками с усами”. Границами ящичка служат первый и третий квартили, линия в середине обозначает медиану. Концы усов — края минимумы и максимумы. Все статические гипотезы проверялись с уровнем значимости 0,05. Анализ различий и апостериорные сравнения осуществляли с помощью непараметрического анализа Краскела–Уоллиса.

Результаты и обсуждение

Состав образцов пыли и их гидрофобность

Образец пыли 1 может быть охарактеризован как сильногидрофобный (WDPT-тест – 851 с, содержание нефтепродуктов 2.66 мг/г, Сорг - 9.5%, рН 7.7), образцы пыли 2 и 3 – как умеренно гидрофобные (WDPT-тест – 420 и 556 с, содержание нефтепродуктов 4.03 и 1.79 мг/г., Сорг 7.4 и 6.2., рН 8.2 и 7.4 соответственно).

Химический анализ пылевых выпадений показал, что пыль с наибольшей степенью гидрофобности имеет наибольшую массовую долю органического вещества. Однако для других образцов подобной тенденции не выявляется, что подтверждают тезис о том, что не всегда высокое содержание органического вещества приводит к увеличению гидрофобности. Для образца 2, имеющего самую слабую степень гидрофобности, зафиксированы наименьшая среди других кислотность, а также наибольшая массовая доля кремния, однако полученная погрешность метода не позволяет сделать каких-либо значимых выводов о степени зависимости гидрофобности от содержания кремния. Анализируя гранулометрический состав образцов пылевых выпадений, можно сказать, что преобладающими в них являются фракции ила (<1 мкм) и мелкой пыли (1–5 мкм). Содержание фракций больше 5 мкм составляет менее 5%. Подобный гранулометрический состав можно объяснить местом отбора проб, все 3 образца отбирали с высоты 0.5 м и более в условиях сильных ветровых потоков от активного трафика, что исключало наличие крупных гранулометрических фракций. Пыль 1 имеющая наибольшую степень гидрофобности, имеет и более тонкий гранулометрический состав, чем пыли 2 и 3.

Моделирование загрязнения почв

Моделирование загрязнения почв пылью 1 показало, что начальные дозы пыли, моделирующие загрязнение первых десятилетий, не оказывают значимого влияния на степень гидрофобности почвы (рис. 1a). По-видимому, это связано с чувствительностью метода. Далее, наблюдается резкий рост времени просачивания водной капли на участке 30–60 лет. При дальнейшем добавлении доз пыли наблюдается резкое увеличение гидрофобности с дальнейшим выходом “на плато” с приближением времени просачивания к времени просачивания водной капли на образце самой пыли, среднее значение которой составляет 851 сек. Данный факт может говорить о том, что почвенный образец достиг практически максимальной степени гидрофобности.

При использовании в качестве аэрального агента пыли 2 гидрофобность опытных образцов почвы имеет на порядок более низкие значения (рис. 1b). Начальные дозы также не оказывают значимого влияния на время просачивания водной капли, однако далее наблюдается устойчивый рост гидрофобности, который не прекращается даже после добавления количества пыли, аналогичного 200-летнему загрязнению. Время просачивания водной капли на образце пыли, используемом в опыте, показало среднее значение 420 с. Данный факт, вместе с результатами моделирования, может говорить о менее интенсивном влиянии данного образца пыли на гидрофобно-гидрофильные свойства почв.

Внесение городской пыли 3 не приносит значимых различий вплоть до предполагаемого загрязнения в 50 лет (рис. 1c). Добавление больших концентраций

приводит к более или менее равномерному увеличению степени гидрофобности фоновой почвы. Среднее значение WDPT-теста на образце самой пыли 3 составляет 556 с, что говорит о том, что, в отличие от пыли 1, где выход на плато лежит в районе 700 с, для пыли 3 характерны меньшие значения для достижения максимальной степени гидрофобности, и они почти достигнуты в процессе эксперимента.

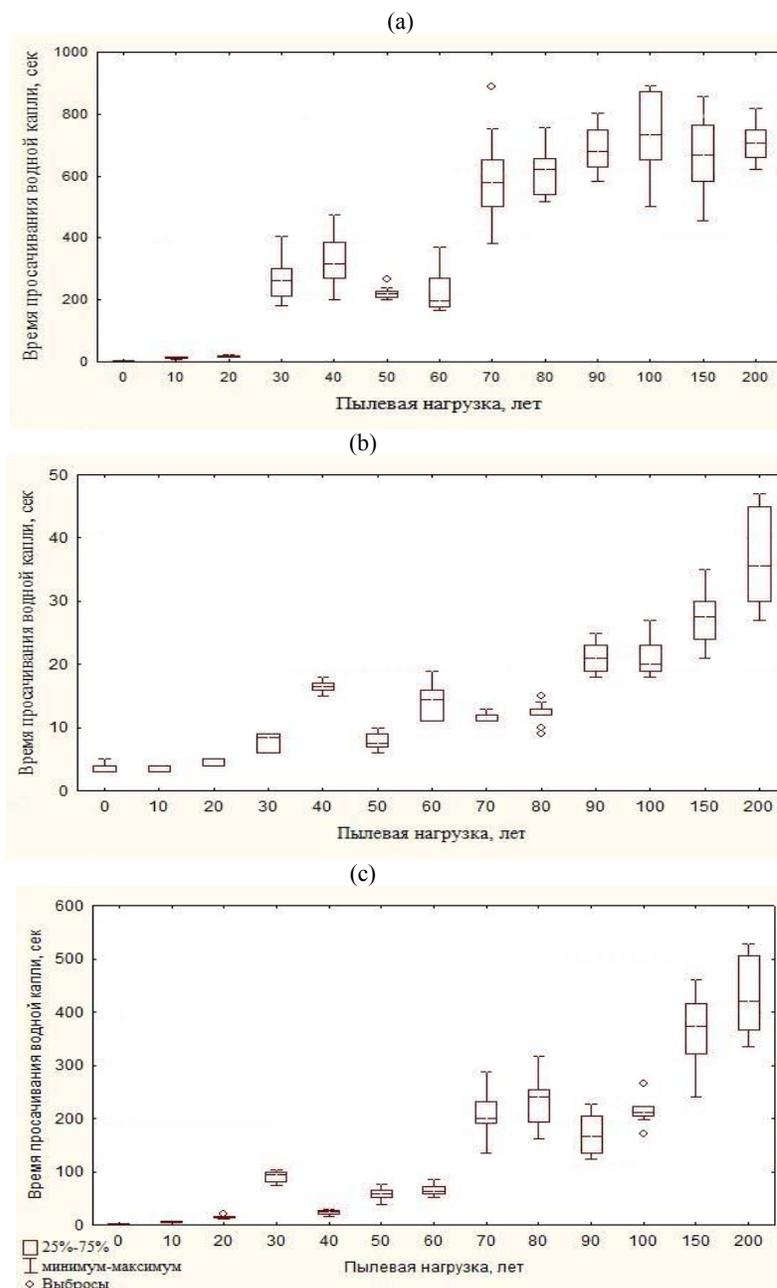


Рис.1. Скорость просачивания водной капли в зависимости от концентрации пыли 1 (a), 2 (b), или 3 (c) в фоновом образце дерново-подзолистой почвы

Результаты WDPT-теста для поверхностных горизонтов почв участков исследования

Исследование ОМВ подтвердило предварительное ранжирование участков по степени предполагаемой антропогенной нагрузки. Также почвы различались и по степени водоотталкивающей способности (табл. 1).

Таблица 1. Средние значения WDPT-теста и ОМВ почв ключевых участков

Номер участка	Местоположение	Время просачивания водной капли, сек	ОМВ, ед. СИ × 10 ⁻³
1	Чашниково	2 ± 1	0.19
2	Алешкинский лес (центр)	97 ± 25	0.19
3	Алешкинский лес (восток)	3 ± 1	0.17
6	ИМГРЭ РАН	237 ± 22	0.43
4	Ботанический сад МГУ	119 ± 31	0.49
5	Придорожный газон МГУ	3 ± 1	0.85
7	ИПЭЭ РАН	1494 ± 289	1.75

Почвы участков, находящиеся в селитебных и транспортных зонах, имеющие большую историю в черте города, ожидаемо имеют наибольшую степень гидрофобности (участки 4 и 6-умеренная и 7-сильная гидрофобность). При этом почва, сформировавшаяся в условиях многолетнего воздействия от автомагистрали и при этом не удобряемая компостами (по крайней мере последние несколько десятилетий) имеет наибольшую гидрофобность. По своей гидрофобности она превосходит даже образцы пыли, использованные в опыте. Причина низких значений WDPT-теста и проявления слабой гидрофобности на участке 5 может быть связана с неоднократными подсыпками разного материала при ремонте коммуникаций, придорожных конструкций и реставрации газонов. Для лесных почв первых трех участков ожидалось малые значения гидрофобности. Явной разницы между лесными почвами Москвы и Московской области не обнаружено. Некоторое увеличение гидрофобности целинной дерново-подзолистой почвы в Алешкинском лесу (смешанный лес), по-видимому, связано с большим количеством органических остатков в гумусово-аккумулятивном горизонте под подстилкой.

Выводы

Результаты модельного опыта показали, что с увеличением количества ТАВ в материале дерново-подзолистой почвы возрастает и уровень ее гидрофобности, хотя характер этой зависимости может быть разный при использовании разных образцов ТАВ. Увеличение происходит постепенно, в течение ряда десятилетий. Степень увеличения гидрофобности почвы зависит от количества и состава пыли.

Установлено, что образцы ТАВ, собранные в разные сезоны, в разных метеорологических условиях, в разных локациях, имеют разные свойства. Образец пыли 1 может быть охарактеризован как сильногидрофобный, образцы пыли 2 и 3 – как умеренно гидрофобные.

Варианты опыта по загрязнению дерново-подзолистой почвы разными образцами пыли демонстрируют различную скорость увеличения степени водоотталкивающей способности. Чем менее гидрофобна пыль, тем более плавно происходит увеличение значений WDPT-теста на графике. Выход на плато был достигнут только для сильно-гидрофобной пыли 1 на отметке 70 лет модельного загрязнения. Почва также стала сильногидрофобной. Для других образцов пыли наблюдался рост значений WDPT-теста вплоть до максимального срока аэрального загрязнения почвы в рамках модельного опыта (200 лет). При загрязнении образцом пыли 2 почва достигла уровня слабой гидрофобности, при загрязнении образцом 3 – умеренной гидрофобности.

Образцы верхних горизонтов реальных городских почв селитебных и транспортных зон имеют среднюю и сильную степень гидрофобности, но городские почвы в условиях природно-рекреационной зоны или рекультивированные демонстрируют слабую гидрофобность.

Соответствие уровней гидрофобности, степени антропогенной нагрузки и времени пребывания участков в городской среде в модельном опыте и в образцах реальных городских почв на участках исследования свидетельствует о том, что твердые атмосферные выпадения являются составляющей гумусово-аккумулятивных горизонтов городских почв и оказывают существенное влияние на их водоотталкивающие свойства.

Литература

- Архипова Л.В., Кормилицына О.В., Бондаренко В.В., Коолен Д. (2007) Проблемы с гидрофобностью почвы и пути их решения. *Вестник МГУЛ – Лесной вестник* 7, 102–106.
- Гладышева М.А. Магнитная восприимчивость урбанизированных почв. Дис. ... канд. биол. наук. М., 2007. 200 С.
- Дымов А.А., Милановский Е.Ю., Холодов В.А. (2015) Состав и гидрофобные свойства органического вещества денсиметрических фракций почв Приполярного Урала. *Почвоведение* 11, 1335–1335.
- Захаров А.А., Бызова Ю.Б., Уваров А.В., Залеская Н.Т., Ланина В.В., Мазанцева Г.П., Орлова Т.А., Сергеева Т.К., Суворов А.А., Янушев В.В. Почвенные беспозвоночные рекреационных ельников Подмосковья. М.: Наука, 1989. 233 с.

- Ладонин Д.В., Михайлова А.П. (2020) Тяжелые металлы и мышьяк в почвах и уличной пыли Юго-Восточного административного округа г. Москвы: результаты многолетних исследований. *Почвоведение* **11**, 1401–1411.
- Почва, город, экология. Под ред. Г.В. Добровольского. М.: Фонд “За экономическую грамотность”, 1997. 320 с.
- Прокофьева Т.В., Шишков В.А., Кирюшин А.В., Калушин И.Ю. (2015) Свойства твердых (пылеаэрозольных) атмосферных выпадений придорожных территорий г. Москвы. *Известия РАН. Сер. Географическая* **3**, 107–120
- Прокофьева Т.В., Шоба С.А., Лысак Л.В., Иванова А.Е., Глушакова А.М., Шишков В.А., Лапыгина Е.В., Шилайка П.Д., Глебова А.А. (2021) Органические компоненты и биота в составе городского атмосферного пылеаэрозоля: потенциальное влияние на городские почвы. *Почвоведение*
- Самаев С.Б., Морозова И.А., Якубов Х.Г. (2001) Влияние магистралей на состояние прилегающих территорий. *Экология большого города. Альманах.* **5**, 49–54
- Таловская А.В., Языков Е.Г., Беспалова А.И. Пространственно-временные тренды пылевого загрязнения снежного покрова в многопрофильном промышленном городе (на примере г. Томск, юг Западной Сибири) // Инженерная экология: Докл. междунар. симп. РНТОРЭС им. А.С. Попова. 2021. С. 186–190.
- Шейн Е.В., Карпачевский Л.О. Теории и методы физики почв. М.: Гриф и К, 2007. 616 с
- Bisdorn E.B.A., Dekker L.W., Schoute J.F.Th., (1993) Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma.* **56**, **I**, 1–4., 105–118
- Daniel N.R.R., Uddin S.M.M., Harper R.J., Henry D.J. (2019) Soil water repellency: A molecular-level perspective of a global environmental phenomenon. *Geoderma.* **338**, 56–66.
- Glushakova A.M., Prokofeva T.V., Lysak L.V., Goncharov N.V., Belov A.A. (2021) Antibiotic-resistant strains of *Escherichia coli* in urban atmospheric dust aerosols of Moscow city—the potential human health risks. *ProScience.* **8**, 11–20.
- Huang J., Hartemink A.E. (2020) Soil and environmental issues in sandy soils. *Earth-Science Reviews.* **208**, 103295.
- Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E. (2020) Enrichment of road dust particles and adjacent environments with metals and metalloids in eastern Moscow. *Urban Climate.* **32**, 100638.
- Milanovskiy E.Yu., Protsenko E.P., Tyugai Z.N., Bykova G.S., Kosolapova N.I., Protsenko A. (2015) Aggregate composition and the contact angle of the soil solid phase

after incubation with peat gel. *Proceeding of the Internationl Congress on "Soil Science in International Year of Soil"*, 274-278.

Prokof'eva T.V., Kiryushin A.V., Shishkov V.A., Ivannikov F.A. (2017) The importance of dust material in urban soil formation: the experience on study of two young Technosols on dust depositions. *J. Soils Sediments*. **17**, 515–524.

Zavgorodnyaya Y.A., Chikidova A.L., Biryukov M.V., Demin V.V. (2019) Polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particulate depositions and urban soils of Moscow, Russia. *Journal of Soils and Sediments*. **19**, 3155–3165.

УДК 631.43

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СВОЙСТВ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ГЕЛЕЙ В ВЫСУШЕННЫХ ОБРАЗЦАХ ПОЧВ

Горепекин И.В., Тарасенко Д.А., Федотов Г.Н.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
decembrist96@yandex.ru

RESTORATION OF THE PROPERTIES OF ORGANOMINERAL GELS IN DRIED SOIL SAMPLES

Gorepekin I.V., Tarasenko D.A., Fedotov G.N.

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: Drying of soil samples increases the size of supramolecular formations (SF) from the soil gels and change soil properties. Humidification of air-dry soils, exposure to moisture for 2 weeks and subsequent freezing allow to return the size of SF and some of gel properties to the state of initial soil.

Введение

Отбор полевых образцов является обязательным этапом лабораторного исследования почвенных свойств. С целью стандартизации данных изучение этих образцов проводят в воздушно-сухом состоянии (ГОСТ 58595-2019). Однако у высушивания почв на воздухе есть недостатки из-за изменения физических и химических свойств почвенных образцов при удалении влаги (Kaiser et.al., 2015; Федотов и др., 2023). Изменение структуры почвенных гелей – одно из таких свойств (Федотов и др., 2023). В частности, было показано (Федотов и др., 2023), что при высушивании почв происходит укрупнение размера надмолекулярных образований гуминовых веществ.

Восстановление почвенных гелей воздушно сухих образцов должно уменьшить расхождение между данными, получаемыми при изучении высушенных и исходных образцов почв. Для этого нужно иметь ясные представления о структурной организации почв. В настоящее время существует две модели ее структурной организации – классическая трехфазная (Шеин, 2005) и гелевая (Тюлин, 1958; Федотов и др., 2023).

С позиции трехфазной модели почва представляет собой систему из трех агрегатных состояний: твердого, жидкого и газообразного.

При высушивании почв в трехфазной модели коагуляционные связи в твердой фазе необратимо переходят к кристаллизационно-конденсационным (Шеин, 2005). Например, при высушивании почв выделяются нерастворимые вещества: алюмо- и железо-гуминовые гели (Александрова 1980). Такой подход фактически отрицает возможность восстановления почвенной структуры после высушивания почв.

С позиции гелевой модели почва представляет собой аналогичную трехфазной модели систему из трех агрегатных состояний. Отличие заключается в наличии на поверхности твердой фазы гелевого слоя, который состоит из коллоидных частиц.

Минеральные почвенные коллоиды образуются при выветривании минералов (Cronan, 2018) и стабилизируются органическим веществом почв за счёт электростатических взаимодействий, сил Ван-дер-Ваальса, гидрофобных сил, Н-связывания, образования катионных мостиков, хелатирования поверхностных ионов, лигандного обмена, а также стерических эффектов (Philippe, Schaumann, 2014).

Почвенные коллоиды – твердые частицы в воде – могут существовать в виде зелей и гелей. Золи – неустойчивые образования, которые при повышении температуры, ионной силы раствора, высушивании и других факторов коагулируют с образованием гелей (Воюцкий, 1975). Обратный переход из гелей в золи требует соблюдения условий для пептизации, которые трудно достижимы в почвах. Поэтому коллоиды в почвах, в основном, существуют в форме гелей.

Специфическое органическое вещество – гуминовые вещества, которые стабилизируют минеральные коллоиды, также существуют в виде частиц коллоидных размеров (Senesi, Wilkinson, 2008). Эти частицы-молекулы взаимодействуют друг с другом, формируя надмолекулярные образования (НМО), которые являются основой почвенных гелей.

В результате объединения органических и минеральных коллоидных частиц между собой и с более крупными минеральными частицами формируются органоминеральные пленки-гели (Тюлин, 1958; Осипов 1979). Эти пленки покрывают и связывают почвенные частицы разных размеров между собой, создавая почвенные отдельные.

При высушивании почв в гелевой модели НМО гуминовых веществ взаимопроникают друг в друга, что приводит к увеличению размера НМО (Федотов и др., 2023) и уплотнению органического вещества почв. Поэтому для возврата структуры почвенных гелей в состояние, предшествующее высушиванию, следует отделить НМО друг от друга.

Целью работы являлся поиск способов возврата в лабораторных условиях гелей воздушно-сухих образцов почв к свойствам образцов, не подвергавшихся высушиванию.

Объекты и методы

Объекты исследования

Способ восстановления структуры гелей приобретает ценность, если он подходит для разделения НМО в различных почвах. Поэтому в исследовании использовали образцы почв:

- дерново-подзолистой (Московская обл.);

- серой лесной (Владимирская обл.);
- серой лесной грунтово-глеевой (Тульская обл.);
- чернозема выщелоченный (Орловская обл.);
- аллювиальной лугово-кислой (Тульская обл.);
- солонца светлого (Волгоградская обл.).

Методы исследования

Для изучения НМО, существующих в почвах, использовали метод растровой электронной микроскопии (РЭМ). Для изучения НМО, существующих в почвах, использовали метод растровой электронной микроскопии. Образцы для РЭМ готовили путем добавления 5 грамм почв к 100 г воды и перемешивания в течение часа. Для отделения органического вещества от неорганических и органоминеральных частиц использовали центрифугу Eppendorf 5804 (Германия), в которой образец центрифугировали в течение 10 минут при скорости 4000 об/мин. Отбирали из верхнего слоя центрифужных пробирок 1 миллилитр раствора и разбавляли в 1000-100000 раз. Из полученных растворов отбирали по 5 мкл, наносили их на поверхность атомно-гладкой слюды и высушивали на воздухе.

Электронно-микроскопическое исследования проводили при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL-6060A (фирмы JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 5 кВ. На образцы перед исследованием напыляли золото, используя установку JFC-1600 (фирмы JEOL, Япония).

Метод лазерной дифрактометрии использовали для изучения илистой и пылевой фракции почв. Образцы для лазерного дифрактометра готовили путем добавления 10 г почвы к 250 мл воды и перемешивания суспензии в течение 20 минут на магнитной мешалке. После этого отделяли крупные частицы на центрифуге Eppendorf 5804 (Германия) в течение 10 минут при скорости 2000 об/мин. Размеры частиц, остающихся во взвешенном состоянии в суспензиях, определяли при помощи лазерного дифрактометра Mastersizer 3000 фирмы Malvern (Великобритания).

Оптическую плотность образцов использовали для оценки содержания илистой и пылевой фракции почв. Процедура подготовки образцов была идентична описанной для дифрактометрии. Оптическую плотность почвенных суспензий воздушно-сухих и исходных, т.е. не подвергавшихся высушиванию почв, определяли при помощи фотокolorиметра КФК-3 (Россия).

Удельную электропроводность почвенных суспензий использовали для сравнения прочности связи ионов в образцах почв, подвергавшихся и не подвергавшихся высушиванию. Процедура подготовки образцов была идентична описанной для дифрактометрии. Удельную электропроводность почвенных суспензий воздушно-сухих и исходных почв определяли при помощи измерителя электропроводности HANNA HI 98312 (Германия).

Для возврата воздушно-сухих почв к состоянию, которое было до высушивания, следует обеспечить подвижность частиц в гелях. Поэтому для поиска необходимого количества воды для ряда образцов изучены диапазоны влажностей:

- дерново-подзолистая почва – 16-32%;
- серая лесная почва – 24-42%;
- серая лесная грунтово-глеевая – 37%;
- чернозем выщелоченный – 24-40%;
- аллювиальная лугово-кислая – 39%;
- солонец светлый – 40%.

В пределах диапазона готовили образцы нескольких влажностей, выдерживали их во влажном состоянии, после чего готовили почвенные пасты. Влияние времени выдерживания влажных образцов на вязкость паст из этих образцов описано в результатах статьи.

Образцы выдерживали во влажном состоянии от 1 до 14 суток, после чего обрабатывали их различными способами:

- прогревом во влажном состоянии при 95°C;
- ультразвуком при использовании УЗ генератора МОД МЭФ 91.1 (ООО «МЭЛФИЗ - ультразвук», Россия) в течение 30 минут при частоте 22 кГц и амплитуде 45 мкм, интенсивность УЗ воздействия 250 Вт/см²;
- «замораживанием-оттаиванием», которое проводили циклами при -20°C.

В качестве метода оценки возврата воздушно-сухих почв к состоянию до высушивания использовали вязкость почвенных паст, отражающую изменение наноструктурной организации почв (Шоба и др., 2022). Связано это с тем, что чем больше НМО выходит из гелевой структуры и способно поглотить воду, тем выше вязкость образца.

Почвенные пасты готовили, перемешивая почвы с необходимым количеством воды стеклянной палочкой 3-5 минут. Содержание воды в пастах варьировало от типа почв:

- дерново-подзолистая почва – 37%;
- серая лесная почва – 47%;
- серая лесная грунтово-глеевая – 50%;
- чернозем выщелоченный – 57%;
- аллювиальная лугово-кислая – 50%;
- солонец светлый – 47%;

Выбор содержания воды в пастах связан с нахождением их вязкости в оптимуме для измерения вискозиметром.

Для определения вязкости паст использовали вибрационный вискозиметр SV-10 фирмы AND (Япония). Принцип работы прибора основан на поддержании амплитуды вынужденных колебаний чувствительного элемента (камертона),

помещенного в вязкую среду, за счет изменения силы тока. Время измерения – 15 сек. Амплитуда колебаний камертона 2 мм.

Результаты и обсуждение

В основе почвенных гелей лежат взаимодействия между частицами-молекулами гуминовых веществ (ГВ) (Тюлин, 1958; Федотов и др., 2023), имеющих мозаичную дифильную поверхность (Милановский, 2009) (Рис. 1А). Эти частицы-молекулы формируют надмолекулярные образования (НМО) (Osterberg, Mortensen, 1992; Senesi, Wilkinson, 2008; Angelico et al., 2023). НМО могут различаться структурной организацией: до 100 нм они существуют в виде фрактальных кластеров (Ф-кластеров) (Рис. 1Б), а при больших размерах – выходят из интервала существования фрактальности (Рис.1В). НМО, взаимодействуя между собой и минеральными частицами, образуют почвенные гели (Рис. 1Г). То есть в основе гелевой модели лежат взаимодействия между частицами органического вещества.

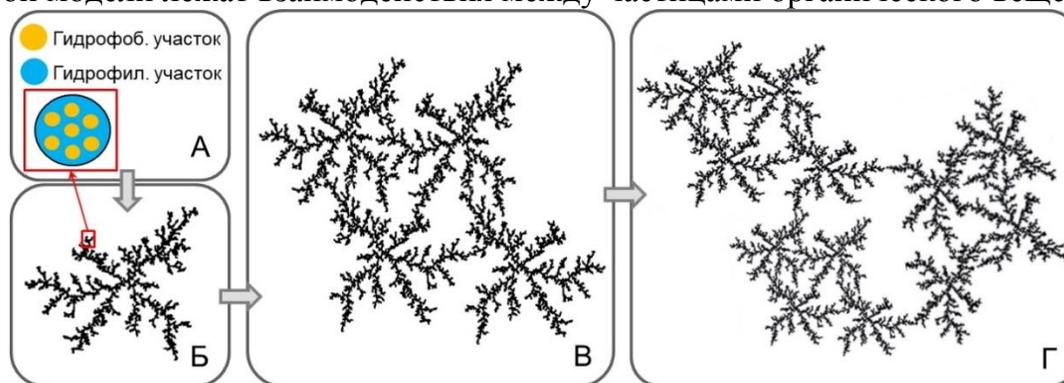


Рис.1. Иерархическая модель наноструктурной организации почв. А – частицы-молекулы гуминовых веществ (ГВ); Б – фрактальный кластер из частиц-молекул ГВ; В – надмолекулярное образование из фрактальных кластеров; Г – фрагмент почвенного геля из надмолекулярных образований.

Во влажных почвах гели представляют собой ажурные заполненные водой структуры. Их основа – НМО, ветви которых взаимодействуют между собой через гидрофобные участки. При высушивании образцов почв, прежде всего, изменяются почвенные гели, которые теряют воду. Процесс потери воды надмолекулярными образованиями должен приводить к их стягиванию, взаимопроникновению и укрупнению из-за снижения сил отталкивания между ионными атмосферами гидрофильных участков частиц-молекул ГВ. Данные по электронной микроскопии это подтверждают (рис. 2): размер НМО высушенных-увлажненных почв больше, чем у исходных образцов.

При объединении НМО и укрупнении их размера в процессе высушивания обратная перестройка гелей в состояние, предшествующее высушиванию, должна

сопровождаться отделением НМО друг от друга. Мы предположили, что возврат воздушно-сухой почвы к исходному состоянию можно осуществить с помощью введения дополнительной энергии в систему. Это приведет к отрыву НМО от гелевой структуры, и увеличению вязкости паст.

Для экспериментальной проверки этого предположения к воздушно-сухому образцу добавляли количество воды, необходимое для достижения влажности наименьшей влагоемкости (НВ), которая обеспечит подвижность НМО. Полученный образец выдерживали в течение двух недель, предполагая, что за это время НМО и пространство между ними в гелях заполнится водой. Затем в систему вводили энергию: почву нагревали до 95 °С в течение суток. Полученный образец обрабатывали 10 мин на УЗ генераторе, остужали при комнатной температуре и выделяли НМО из почв для РЭМ.

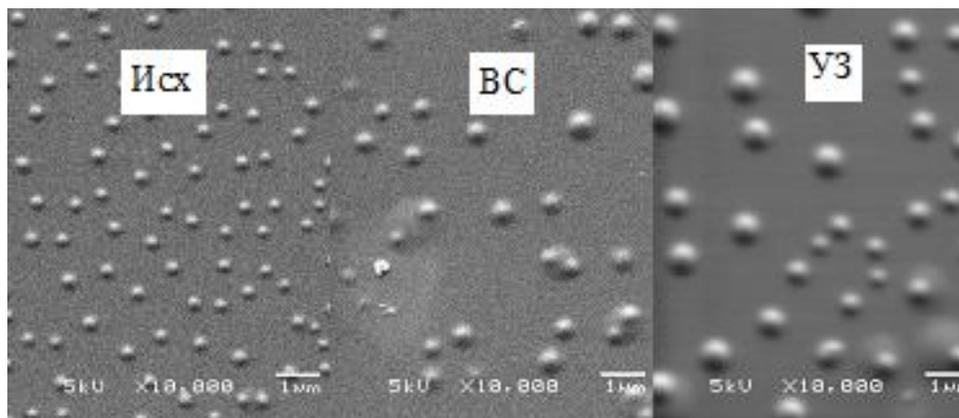


Рис. 2. Электронно-микроскопические фотографии НМО из образцов дерново-подзолистых почв Исх (исходный), ВС (воздушно-сухой) и УЗ (обработанный температурой и ультразвуком).

Проведенные эксперименты показали, что нагрев и УЗ-обработка почвенных паст приводили не к уменьшению, а укрупнению размеров НМО в почвах. То есть НМО не удается разделить (рис. 2). По-видимому, НМО не разделяются потому, что они преимущественно образованы гидрофобными связями, которые упрочняются с ростом температуры (Doerr et al., 2000; Вережников, 2012).

Для предотвращения упрочнения гидрофобных связей в НМО механическое воздействие, разделяющие НМО, должно происходить без повышения или при понижении температуры. Опираясь на эту информацию, мы предположили, что при замораживании образцов будут происходить:

- снижение прочности связей между гидрофобными участками НМО из-за уменьшения температуры;

– разделение НМО при кристаллизации льда из-за роста его объема по сравнению с водой и возникновения механических сил, отделяющих НМО друг от друга.

Работы по влиянию замораживания на почвенные свойства (прежде всего на водоустойчивость), если их рассматривать с позиций разрыва связей между НМО, это подтверждают (Dagesse, 2013; Скворцова и др., 2018).

Возврат структуры почвенных гелей к их состоянию до высушивания путём замораживания мы проверили при помощи вибрационной вискозиметрии. Выбор метода связан с тем, что вязкость почвенных паст, обусловленная способностью гелей набухать, зависит от их строения (Шоба и др., 2022). Чем меньше НМО в гелях связаны между собой, тем сильнее гели должны набухать, вбирая в себя воду и увеличивая вязкость почвенных паст.

Эффект разделения НМО в гелях путём замораживания должен проявиться при максимальном заполнении НМО и пространства между ними водой. Эксперименты показывают, что при влажности для каждой почвы ниже определенной величины замораживание не влияет на изменение их вязкости. Для примера приведены данные по чернозему (табл. 1). Поэтому для набухания почвенных гелей в образце почвы должно быть достаточное количество воды: от НВ и выше.

На следующем этапе исследования мы сравнили вязкость почвенных паст трёх образцов:

1. не подвергавшихся высушиванию;
2. воздушно-сухих;
3. воздушно-сухих, увлажненных и замороженных.

Результаты экспериментов на дерново-подзолистой, серой лесной почве и черноземе показали (табл. 1), что вязкость высушенных образцов удается восстановить до значений образцов, не подвергавшихся высушиванию. Для этого необходимо увлажнить образцы до наименьшей влагоемкости (НВ) и выдержать 14 суток, после чего провести заморозку при -20°C .

Полученные результаты говорят о том, что при увлажнении воздушно-сухих почв до значений НВ влага равномерно распределяется по образцу в течение 14 суток, а последующая заморозка позволяет разорвать связи между НМО в почвенных гелях за счёт расширения заключенной в них воды. Схема этого процесса представлена на рис.3.

На следующем этапе исследования мы проверили результаты вискозиметрии. Для этого методом лазерной дифрактометрии сравнили содержание частиц илистой фракции, а также мелкой и средней пыли в образце чернозема: не подвергавшегося высушиванию, воздушно-сухого и восстановленного замораживанием. Результаты экспериментов показали (рис. 4), что замораживание приводит к заметному росту числа мелких частиц в восстановленном замораживанием почвенном образце по сравнению с его воздушно-сухим аналогом. Это подтверждает данные

вискозиметрии: замораживание увлажненных почв увеличивает количество свободных НМО, не связанных с почвенными гелями.

Таблица 1. Влияние параметров процесса обработки образцов чернозема на вязкость почвенных паст. Содержание воды в пасте 57%

№	Время после добавления в воздушно-сухую почву воды, с	Влажность почвы после добавления в воздушно-сухую почву воды, %		Количество циклов «замораживание-оттаивание»	Вязкость пасты, мПа сек
		Без добавления воды	Без добавления воды		
Образец, не подвергавшийся высушиванию	Без добавления воды	Без добавления воды	0	3900±330	
Воздушно-сухой образец	Без добавления воды	Без добавления воды	0	240±20	
1	14	40	0	420±35	
2	2	40	1	310±25	
3	5	40	1	2150±180	
4	10	40	1	4140±350	
5	14	24	1	120±10	
6	14	28	1	200±15	
7	14	30	1	230±20	
8	14	35	1	860±70	
9	14	37	1	1620±140	
10	14	40	1	3840±320	
11	14	40	2	3550±300	
12	14	40	3	2820±240	
13	14	40	5	2400±200	

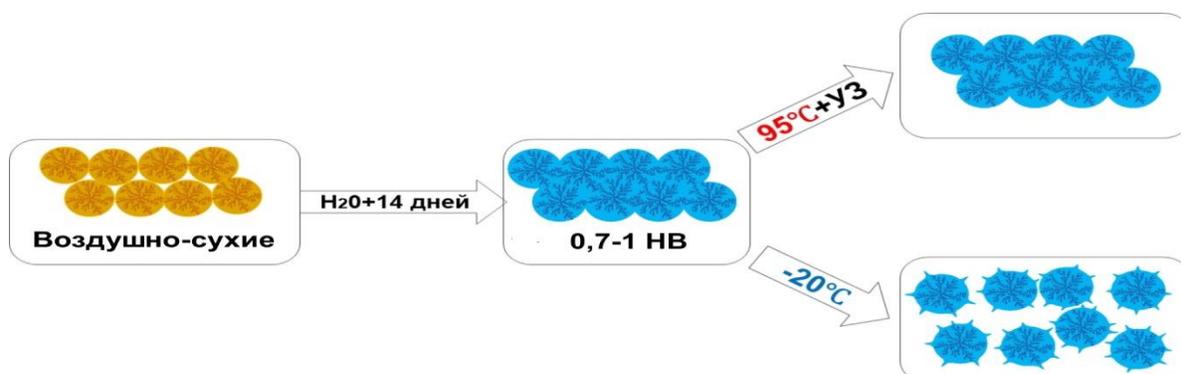


Рис. 3. Схема изменений системы из Ф-кластеров при различных воздействиях на нее.

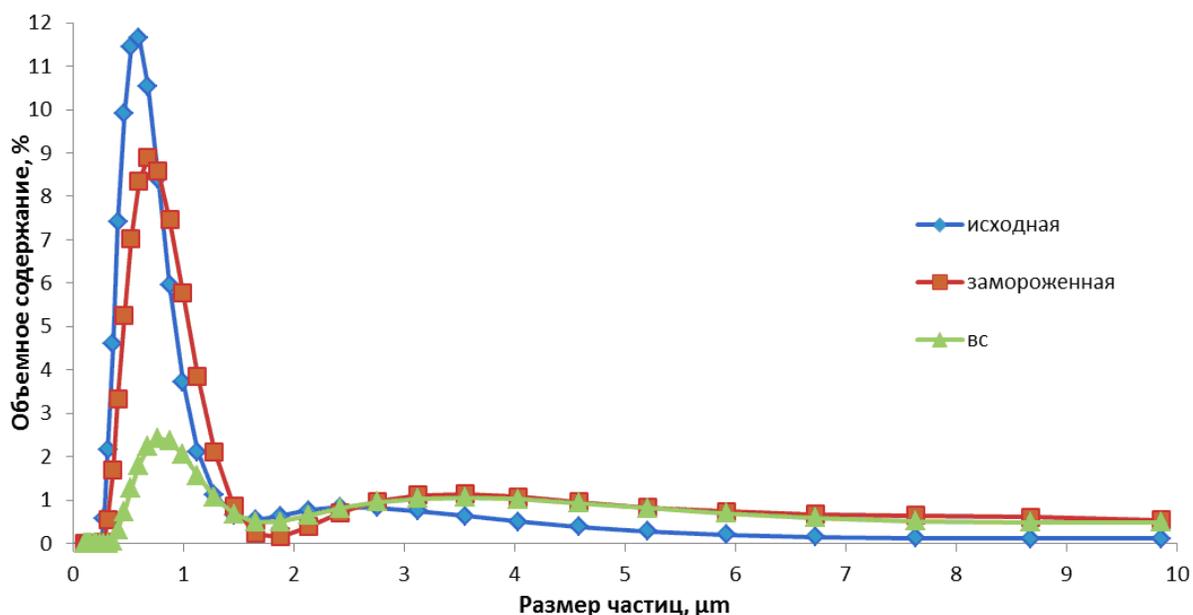


Рис. 4. Влияние пробоподготовки почв на распределение в ней частиц по размерам (чернозем). Исходная, воздушно-сухая (ВС), воздушно-сухая увлажненная до НВ и подвергнутая замораживанию-оттаиванию (замороженная).

Сходные результаты были получены при изучении влияния восстановленных замораживанием почвенных образцов на оптическую плотность приготовленных из них водных вытяжек. Замораживание приводит к увеличению оптической плотности вытяжек (табл. 2). Это согласуется с данными дифрактометрии: замораживание увеличивает долю частиц размером 3-10 мкм, которые повышают мутность суспензии.

Замораживание влажных почвенных образцов позволяет вернуть их структурную организацию к образцам почв, которые не подвергались высушиванию. Однако вернуть ионы в них в места исходного закрепления при помощи замораживания образцов не удается (табл. 4).

Таблица 2. Свойства водных вытяжек образцов чернозема с разной пробоподготовкой

Свойства вытяжек	Образцы Чернозем		
	Исходный образец	Воздушно-сухой образец	Образец, обработанный замораживанием
Удельная электропроводность, мСм/см	0,07±0,01	0,13±0,01	0,17±0,02
Оптическая плотность	0,462±0,037	0,148±0,012	0,846±0,068

Таким образом, замораживание увлажненных воздушно-сухих образцов чернозема, серой лесной и дерново-подзолистой почв позволяет приблизить структурную организацию их гелей к состоянию образцов, не подвергавшихся высушиванию, однако, как показывают эксперименты (табл. 3), это восстановление характерно не для всех почв.

Таблица 3. Влияние насыщения водой образцов воздушно-сухих почв и их замораживания на вязкость приготовленных из них почвенных паст

Образец	Способ подготовки	Воздушно-сухой образец, мПа*сек	Воздушно-сухой, увлажненный 14 суток и замороженный образец, мПа*сек
Солонец светлый		340±29	330±25
Серая лесная грунтово-глеевая		1250±105	1100±100
Аллювиальная		9630±800	9580±800

Выводы

1. При высушивании почвенных образцов происходит укрупнение выделяемых из них надмолекулярных образований гуминовых веществ.
2. Нагрев и УЗ-обработка укрупняют размер надмолекулярных образований гуминовых веществ и не позволяют вернуть организацию почвенных гелей к состоянию образцов, не подвергавшихся высушиванию.
3. Показана возможность восстановления замораживанием структурной организации почвенных гелей высушенных почв: дерново-подзолистой, серой лесной почвы и чернозема до состояния не подвергавшихся высушиванию образцов.

Благодарность

Работа выполнена в рамках темы государственного задания МГУ №122011800459-3.

Литература

- Александрова Л.Н. (1980) Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 288.
- Вережников В. Н. (2012) Взаимодействие поверхностно-активных веществ и олигомерных электролитов в водных растворах. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация*, **1**, 29-32.
- Воюцкий С.С. (1975) Курс коллоидной химии. М., Химия, 512.
- ГОСТ 58595-2019 Почвы. Отбор проб, 8.

- Милановский Е.Ю. (2009) Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 186.
- Осипов В.И. (1979) Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: МГУ, 235.
- Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Юдина А.В., Ключева В.В., Хайдапова Д.Д., Рогов В.В. (2018) Влияние многократного замораживания-оттаивания на микроструктуру агрегатов дерново-подзолистой почвы (микротомографический анализ). *Почвоведение*, **2**, 187–196. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32433092>
- Тюлин А.Ф. (1958) Органно-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М.: АН СССР, 52.
- Федотов Г.Н., Шеин Е.В., Ушкова Д.А., Салимгареева О.А., Горепекин И.В., Потапов Д.И. (2023) Надмолекулярные образования из молекул гуминовых веществ и их фрактальная организация. *Почвоведение*, **8**, 903-910. <https://elibrary.ru/item.asp?id=53985895>
- Шеин Е.В. (2005) Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 432.
- Шоба С.А., Потапов Д.И., Горепекин И.В., Ушкова Д.А., Грачева Т.А., Федотов Г.Н. (2022) Состояние почвенных гелей при разной пробоподготовке к вискозиметрии образцов дерново-подзолистой почвы. Доклады Российской академии наук. Науки о жизни, 504, 240-244. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48649010>
- Angelico R., Colombo C., Di Iorio E., Brtnický M., Fojt J. and Conte P. (2023) Humic substances: from supramolecular aggregation to fractal conformation – Is there time for a new paradigm? *Applied Sciences*, **13(4)**, 2236. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/4/2236>
- Cronan C. S. (2018) Mineral Weathering. *Ecosystem Biogeochemistry: Element Cycling in the Forest Landscape*, 87-100. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-66444-6.pdf>
- Dagesse D.F. (2013) Freezing cycle effects on water stability of soil aggregates. *Canadian Journal of Soil Science*, **93(4)**, 473-483. <https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.4141/cjss2012-046>
- Doerr S. H., Shakesby R. A., Walsh R. P. D. (2000) Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, **51 (1-4)**, 33-65. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825200000118>
- Kaiser M., Kleber M., Berhe A. A. (2015) How air-drying and rewetting modify soil organic matter characteristics: an assessment to improve data interpretation and inference. *Soil Biology and Biochemistry*, **80**, 324-340. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071714003654>
- Österberg R., Mortensen K. (1992) Fractal dimension of humic acids: A small angle neutron scattering study. *European biophysics journal*, **21**, 163-167. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00196759>

- Philippe A., Schaumann G. E. (2014) Interactions of dissolved organic matter with natural and engineered inorganic colloids: a review. *Environmental science & technology*, **48(16)**, 8946-8962. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es502342r>
- Senesi N., Wilkinson K. J. (2008) Biophysical chemistry of fractal structures and processes in environmental systems. John Wiley & Sons, 342.

УДК 631.4

УЛУЧШЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЧВЫ ПОД КОРМОВЫМИ КУЛЬТУРАМИ В ОРОШАЕМЫХ И БОГАРНЫХ УСЛОВИЯХ

Гумматов Н.Г.

Научно-исследовательский институт земледелия, Баку, Азербайджан
ngummatov@mail.ru

IMPROVEMENT OF SOIL STRUCTURE UNDER FORAGE CROPS IN IRRIGATED AND
RAINFED CONDITIONS

Hummatov N.G.

Research Institute of Crop Husbandry, Baku, Azerbaijan

Annotation: This study examines the influence of pure and mixed crops of annual grains (barley, oats, triticale) and leguminous crops (fodder peas) on the structural and aggregate composition of the soil and the yield of green mass of plants on ordinary gray-brown (chestnut) and typical mountain chernozem soils in irrigated and rainfed conditions. The results of the study indicate that during the spring-summer growing season of plants in both conditions, the structural condition of the soil in the arable layer improves comparatively.

Введение

Сельскохозяйственные культуры защищают почву от агентов эрозии, улучшают структуру почвы за счет укоренения и обогащают почву питательными веществами, обеспечивая образование органического вещества и симбиотических отношений с почвенными бактериями. Растения из почвы получают воду, растворенные в ней минеральные соли, воздух для дыхания корней, и таким образом сильно влияют на почву и изменяют ее свойства. Растения – главный источник снабжения почвы органическими веществами. Без органических веществ было бы невозможным формирование плодородного слоя почвы – гумуса, а это в свою очередь, сделало бы невозможным существование как почвенной флоры, так и фауны. Культурные растения, как и растения естественных ассоциаций, оказывают исключительно большое влияние на свойства почвы. Они пронизывают ее корневой системой, изменяя ее структуру и сложение, воздействуя на биохимические процессы в течение всего периода вегетации. Влияние культур на структурно-агрегатный состав почвы связано как с биологическими особенностями самих растений, так и с механическим воздействием на почву сельскохозяйственной техники, отвечающих технологиям выращивания отдельных культур (Гумматов, Пачепский, 2016; Bronick, Lal, 2005).

Известно, что среди факторов образования агрономически ценных агрегатов (0,25-10 мм) основная роль принадлежит корневой системе растений. В земледелии при выращивании сельскохозяйственных культур происходят два взаимосвязанных и противоположных процессов: с одной стороны, синтез и накопление органического вещества, и создание структуры почвы, с другой – разложения и разрушения органического вещества и разрушение структуры. Интенсивность этих процессов и определяет конечные результаты. Чем интенсивнее формируется и медленнее разрушается органическое вещество почвы, тем больше образуется водопрочных агрегатов, и они дольше сохраняются в почве.

Наиболее благоприятно на структуру почвы оказывают влияние растения с хорошо развитой корневой системой и высокой продуктивностью надземной массы, которые сплошь укрывают почву. Этим требованиям отвечают многолетние бобовые и злаковые травы или их смеси (Хасанова, 2015). Поэтому под их влиянием создаются агрономически ценные и водопрочные агрегаты. В то же время обнаруживается положительная корреляция между структурными агрегатами и урожайностью растений. Заметное влияние на структуру почвы так же оказывают однолетние зерновые и зернобобовые культуры или их смеси. Но, их роль в структурообразовании сравнительно меньше, чем многолетних трав, что связано коротким вегетационным периодом.

Учитывая вышесказанное, цель проведения исследования состоит в изучении влияния чистого и смешанного посева однолетних зерновых (ячмень, овёс, тритикале) и зернобобовых (кормовой горох) культур в орошаемых и богарных условиях на структурно-агрегатный состав почвы и урожай зеленой массы посевов в весенне-летний период.

Объекты и методы

Исследование проводилось в 2022-2023 годах на Агстафинском подсобно-экспериментальном хозяйстве (ПЭХ) и на Кедабекском опорном пункте (ОП) научно-исследовательского института земледелия МСХ Азербайджанской Республики. Территория Агстафинского ПЭХ являлась орошаемым районом, в основном состоящим из обыкновенного серо-коричневого (каштанового) почвенного покрова (N 41°06.230', E 45°27.567', 342 м над уровнем моря). Климат района умеренно теплый и субтропический, с засушливой зимой. Годовое количество осадков составляет 350-700 мм. Кедабекский ОП расположен в богарных условиях, и на территории распространены в основном типичные горно-черноземные почвы (N 40°37.412', E 45°48.835', 1619 м над уровнем моря). Климат района умеренно теплый с засушливым летом, холодный с засушливой зимой и горным тундровым климатом. Годовое количество осадков составляет 600-900 мм.

Исследование проводилось в эксперименте с чистыми и смешанными посевами однолетних зерновых и зернобобовых культур. Опыт состоит из 6 вариантов,

состоящих из 3 повторений: 1. Ячмень, 2. Ячмень + кормовой горох, 3. Овёс, 4. Овёс + кормовой горох, 5. Тритикале, 6. Тритикале + кормовой горох. Посевная норма ячменя, овса и тритикале в чистых посевах составляет 180, 180 и 160 кг с гектара соответственно. Смешанные посевы зерновых и зернобобовых культур проводили в соотношении 2:1. Эксперимент проводился по одной и той же схеме в обоих хозяйствах. Площадь каждой делянки составила (3x5) м², а общая площадь экспериментального участка - (19x25) м². В условиях орошения посев проводился в марте, а в богарных условиях в апреле. Урожайность зеленой массы на единицу площади определяют в фазе цветения-бутонизации растений соответственно в июне и июле. На практике не применялись средства защиты растений, минеральные и органические удобрения.

Образцы почвы отбирали с 2-х глубин (5-10 и 20-25 см) для всех вариантов и повторностей перед посевом и после уборки урожая. Агрохимические характеристики опытного участка (рН, СаСО₃, гумус, общий N, подвижный Р₂О₅, обменный К₂О) определяли по существующим методикам (Аринушкина, 1970) перед посевом. Гранулометрический состав почвы определяли по методу Бойюкоса (Воиуоосос, 1962), а структурно-агрегатный состав - по методу Саввинова (Вадюнина, Корчагина, 1986). Средневзвешенный диаметр агрегатов (D) рассчитывали по следующей формуле (Теории и методы..., 2007):

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (Mi \times di)}{\sum_{i=1}^n Mi},$$

где Mi – весовой процент фракции структурных или водопрочных агрегатов со средним диаметром di , n – количество фракций.

Результаты и обсуждение

Гранулометрический состав и агрохимические свойства почвы перед посевом на обоих исследуемых участках определялись соответствующими методами и результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Средние значения гранулометрического состава и агрохимических свойств почв

Глубина (см)	Песок (%)	Пыль (%)	Глина (%)	рН	СаСО ₃ (%)	Гумус (%)	N (%)	Р ₂ О ₅ (мг/кг)	К ₂ О (мг/кг)
Агстафинский ПЭХ									
5-10	8.9	41.8	49.3	7.93	6.25	2.59	0.20	4.3	675.5
20-25	9.2	42.3	48.5	7.96	7.30	2.10	0.17	3.2	490.0
Кедебекский ОП									
5-10	16.0	45.0	39.0	5.89	1.30	4.40	0.34	16.7	521.0
20-25	18.6	41.9	39.5	5.87	1.65	4.07	0.32	8.3	364.5

Как видно из таблицы, гранулометрический состав орошаемых обыкновенных серо-коричневых (каштановых) почв (Агстафинский ПЭХ) по классификации МСХ США (USDA) представляет собой пылеватую глину (silty clay). Типичные горно-черноземы (Кедабекский ОП) представляют собой пылеватые тяжелые суглинки (silty clay loam). Из таблицы видно, что почвы существенно различаются по агрохимическим свойствам.

Структурно-агрегатный состав почвы важен с экологической точки зрения и напрямую связан с продуктивностью почвенно-растительного покрова (Шеин, Гончаров, 2006; Hummatov, 2020). С агрономической точки зрения почва с «хорошей» структурой и водопрочным агрегатным составом также продуктивна и плодородна (Вальков и др., 2008).

Результаты анализа структурно-агрегатного состава почвы по вариантам приведены в таблице 2. Как видно из таблицы, структурно-агрегатный состав почвы на обеих глубинах улучшается преимущественно в весенне-летний период вегетации растений на участках исследований (за 4 месяца). Таким образом, количество агрономически ценных (10-0.25 мм) и водопрочных (>0.25 мм, особенно фракции 1-3 мм) агрегатов увеличивается в большинстве случаев к концу вегетации растений (табл. 2). В целом заметные положительные изменения в структурно-агрегатном составе почвы наблюдаются у Агстафинского ПЭХ как по количеству АЦА, так и по количеству водопрочных агрегатов (ВА) размером более 0.25 мм, а у Кедабекского ОП преимущественно по количеству ВА. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об относительном улучшении структурно-агрегатного состава почвы за короткий период времени под чистыми и смешанными посевами однолетних зерновых и зернобобовых культур на обоих участках исследований. Эта тенденция наблюдается и по другим показателям структурно-агрегатного состава (D_c , D_m , C_A).

При этом качественная зеленая масса получается из чистых и смешанных посевов, что позволяет в определенной степени удовлетворить потребность животных в зеленых кормах (Шевченко, Просвирик, 2012; Ренёва, 2018). С этой точки зрения как в условиях орошения (Агстафинский ПЭХ), так и в богарных условиях (Кедабекский ОП) наибольшая урожайность зеленой массы у посевов овёс + кормовой горох (413.3 и 310.1 ц/га) и овёс (324.7 и 300.5 ц/га), соответственно. При этом в обоих условиях относительно высокая зеленая масса наблюдается в чистых и смешанных посевах тритикале и тритикале с кормовым горохом. Поэтому чистые и смешанные посевы однолетних зерновых и зернобобовых культур как в условиях орошения, так и в богарных условиях, с одной стороны, создают условия для улучшения структурного состояния почвы, а с другой стороны, дают возможность применения «зеленого конвейера» в укреплении кормовой базы животноводства.

Таблица 2. Структурно-агрегатный состав почвы под посевами зерновых и зернобобовых культур (среднее за 2022-2023 гг.)

Культура	Глубина (см)	АЦА (%)	D _c (мм)	ВА (%)	D _m (мм)	C _A
Агстафинский ПЭХ						
Ячмень	5-10	76.4 ^I /83.4 ^{II}	3.6/3.8	49.7/45.3	0.47/0.45	151/165
	20-25	78.8/84.9	4.6/4.7	54.9/61.1	0.66/0.79	232/285
Ячмень + горох	5-10	76.3/82.3	4.6/4.0	54.9/57.1	0.64/0.75	135/196
	20-25	78.6/84.2	5.1/4.6	60.0/64.0	0.73/0.84	264/242
Овёс	5-10	78.8/84.5	3.7/2.7	52.5/52.2	0.55/0.56	167/139
	20-25	80.1/89.3	4.9/4.0	58.6/62.7	0.74/0.79	237/277
Овёс + горох	5-10	77.9/85.8	3.5/3.2	52.0/55.1	0.56/0.59	159/168
	20-25	79.6/82.0	4.2/4.9	51.8/59.1	0.64/0.72	202/254
Тритикале	5-10	78.1/81.2	3.4/3.7	50.8/53.5	0.65/0.63	155/169
	20-25	79.0/79.3	4.5/4.5	50.5/54.7	0.61/0.72	209/197
Тритикале + горох	5-10	78.6/89.1	3.3/2.6	47.0/49.7	0.53/0.47	134/146
	20-25	80.0/84.7	4.3/4.0	55.4/56.0	0.62/0.68	212/228
Кедебекский ОП						
Ячмень	5-10	82.9/79.7	2.8/3.6	57.3/57.4	0.88/0.82	125/175
	20-25	79.9/79.2	4.0/5.0	66.4/73.4	1.28/1.37	163/273
Ячмень + горох	5-10	85.4/76.3	2.9/4.8	50.4/60.6	0.73/0.81	124/284
	20-25	85.7/86.0	3.6/4.4	68.8/72.4	1.19/1.39	190/238
Овёс	5-10	83.9/84.4	2.7/3.1	56.9/59.5	0.71/0.74	130/255
	20-25	82.9/83.0	4.8/4.4	72.0/72.5	1.32/1.41	241/213
Овёс + горох	5-10	77.9/81.6	3.3/3.8	58.7/57.6	0.83/0.68	157/216
	20-25	83.6/82.0	4.1/4.6	69.9/73.0	1.51/1.40	171/233
Тритикале	5-10	85.1/79.8	3.0/3.1	50.9/55.6	0.59/0.71	137/141
	20-25	86.6/82.7	3.7/3.9	66.9/68.7	1.41/1.21	163/204
Тритикале + горох	5-10	81.5/77.3	3.6/4.0	55.4/58.3	0.84/0.78	139/209
	20-25	83.9/81.4	4.6/4.9	71.6/73.0	1.47/1.34	195/302

Примечание. АЦА – агрономически ценные агрегаты (0.25-10 мм); ВА – водопрочные агрегаты (>0.25 мм); D_c и D_m – средневзвешенный диаметр структурных и водопрочных агрегатов; C_A – критерий водопрочности АФИ; ^{I, II} – время отбора образцов перед посевом и после укоса соответственно.

Выводы

Результаты исследований показывают, что структурное состояние пахотного слоя обыкновенных серо-коричневых (каштановых) и типичных горных черноземных почвах в весенне-летний период вегетации в чистых и смешанных посевах однолетних зерновых и зернобобовых культур при орошаемых и богарных условиях относительно улучшились. Таким образом, применяя соответствующие технологии в своих хозяйствах, фермеры, работающие в соответствующих регионах,

могут удовлетворить свои потребности в зеленых кормах и добиться защиты плодородия за счет улучшения структурного состояния и водопрочности своей почвы. Кроме того, использование короткоротационного севооборота, состоящего из различных зерновых и зернобобовых культур, может оказаться более экономически эффективным методом с точки зрения восстановления плодородия почв и удовлетворения потребности в зеленых кормах.

Литература

- Аринушкина Е.В. (1970) Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 487 с.
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. (1986) Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 416 с.
- Вальков В.Ф., Денисова Т.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Кузнецов Р.В. (2008) Плодородие почв и сельскохозяйственные растения: экологические аспекты. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 416 с.
- Гумматов Н.Г., Пачепский Я.А. (2016) Современные представления о структуре почв и структурообразовании: механизмы и модели, динамика и факторы (2-е изд.). Баку: Изд-во «Муаллим», 100 с.
- Ренёва Ю.А. (2018) Нормы высева, дозы и способы внесения азотных удобрений в агротехнологии горохо-ячменных агрофитоценозов в Предуралье. Пермь: ИПЦ «Прокрость», 170 с.
- Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В.Шейна и Л.О.Карпачевского (2007). М.: Изд-во «Гриф и К», 616 с.
- Хасанова Р.Ф. (2015) Эколого-агрофизическая характеристика почвенных агрегатов под травами естественных и сельскохозяйственных экосистем. *Известия Самарского НЦ РАН* **17(4)**, 875-879.
- Шевченко В.А., Просвирик П.Н. (2012) Продуктивность смешанных посевов зерновых и зернобобовых культур при возделывании на дерново-среднеподзолистых почвах Верхневолжья. *Плодородие* **3**, 26-28.
- Шейн Е.В., Гончаров В.М. (2006) Агрофизика. Ростов-на-Дону: Феникс, 400 с.
- Bouyoucos G.J. (1962) Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal* **54(5)**, 464-465.
- Bronick C.J., Lal R. (2005) Soil structure and management: a review. *Geoderma* **124**, 3-22.
- Hummətov N.G. (2020) Role of soil-ecological environment physical properties regulation in improving of soil health and plant productivity. *Proceedings of Research Institute of Crop Husbandry* **2(31)**, 9-38. <https://www.aetei.az>

УДК 631.423.6:631.82

МИКРОБНОЕ ДЫХАНИЕ КАК ИСТОЧНИК ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА «ЧАШНИКОВО»

Деревенец Е.Н., Кулачкова С.А., Манакова О.И., Мешалкина Ю.Л., Сорокин А.С.

Факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
lizaderevenets@yandex.ru

MICROBIAL RESPIRATION AS A SOURCE OF CARBON DIOXIDE IN SOILS OF THE
“CHASHNIKOVO” CARBON POLYGON

Derevenets E.N., Kulachkova S.A., Manakova O.I., Meshalkina J.L., Sorokin A.S.

Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: An essential aspect of the carbon cycle involves soil microbial respiration, which depends on local natural characteristics, including the soil physical properties. It was delineated the baseline conditions for carbon balance monitoring within the ecosystems of the "Chashnikovo" carbon polygon, focusing on the microbial production in both natural and anthropogenic soils.

Введение

В свете современных глобальных вызовов, связанных с изменением климата, особенно важным становится мониторинг эмиссии и поглощения парниковых газов, а также изучение углеродного цикла в наземных экосистемах. Почвы играют ключевую роль в цикле углерода, обеспечивая обмен веществом и энергией между различными компонентами экосистемы и выполняя, в том числе, климаторегулирующие функции.

Для создания российской системы мониторинга поглощения углерода и оценки пулов и потоков парниковых газов в различных экосистемах России ведётся научная работа в проекте сети карбоновых полигонов (Приказ Минобрнауки России, 2021). Карбоновые полигоны – это территории с репрезентативными для конкретных регионов экосистемами, созданные с участием университетов и научных организаций для реализации мер контроля климатически активных газов (Карбоновые полигоны Российской Федерации). Один из таких полигонов – карбоновый полигон МГУ «Чашниково», расположенный в Московской области и представляющий ее типичные естественные и антропогенные ландшафты.

При изучении потоков парниковых газов в экосистемах важно уделять внимание вкладу различных компонентов в формирование и изменение данных потоков. Известно, что основной вклад в эмиссию диоксида углерода (CO₂) почвами вносят биогенные источники – микробное (гетеротрофное) и корневое (автотрофное) дыхание (Смагин, 2005; Kuzyakov, 2006; Кудеяров и др., 2007;

Ильясов и др., 2020). В среднем микробное и корневое дыхание почвы составляет 60 и 40% от эмиссии CO_2 почвой соответственно (Bond-Lamberty et al., 2004).

Без учета доли микробной продукции CO_2 в общей эмиссии CO_2 почвами оценка баланса углерода в экосистеме труднодостижима, в связи с чем одним из актуальных направлений исследований на карбоновых полигонах является изучение микробного дыхания почв. Исследования микробного дыхания почв Московского области многочисленны, но отмечается его высокая вариабельность в различных экосистемах (Курганова, 2010; Susyan et al., 2011; Иващенко и др., 2014). Поскольку интенсивность микробного дыхания почвы зависит от сочетания факторов конкретной местности, в том числе от физических и химических свойств почв, востребованность мониторинговых исследований базального дыхания почв и его вклада в биогеохимический цикл углерода на территории карбонового полигона «Чашниково» возрастает.

Цель работы – оценка микробного дыхания как источника CO_2 в природных и антропогенных почвах карбонового полигона «Чашниково». В задачи исследования входило: для середины вегетационного периода выявить профильное распределение базального дыхания и микробной биомассы в зависимости от физических и химических свойств почв, оценить запасы углерода микробной биомассы и микробную продукцию CO_2 почвами различных экосистем.

Приводимые в настоящей работе результаты характеризуют начальные условия для последующего многолетнего мониторинга составляющих углеродного баланса экосистем карбонового полигона «Чашниково», чем объясняется их научная значимость.

Объекты и методы

Объектом исследования выступали почвы карбонового полигона «Чашниково», расположенного в Солнечногорском городском округе Московской области на территории Учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ имени М.В. Ломоносова.

В настоящей статье рассматриваются четыре наиболее близко расположенные мониторинговые площадки, заложенные в 2023 г., находящиеся в автоморфных условиях: две – в естественных экосистемах, две – в агроэкосистемах. Полевые исследования почвенных свойств были проведены в летний период, с 28.06 по 03.07.2023 г. На каждой из площадок примерно в середине был заложен разрез и по разные стороны от него на расстоянии 10-20 м – две полуямы.

Естественные экосистемы характеризуют площадки №3 и №4. Площадка №3 «Лес» (56.04415 С.Ш., 37.17052 В.Д.) расположена во вторичном ельнике папоротниково-снытиево-кисличном на дерново-сверхглубокоподзолистой глееватой, мелкой, легкосуглинистой почве (Классификация и диагностика..., 2004) (WRB: Gleyic Retisol (Loamic)), площадка №4 «Луг» (56.04478 С.Ш., 37.17306 В.Д.)

– на суходольном тимopheевко-таволговом разнотравном лугу на дерново-глубокоподзолистой профильно глееватой, средне мелкой, среднесуглинистой почве (Gleyic Retisol (Loamic)). Агроэкосистемы представляют площадки на агродерново-подзолистых языковатых, глееватых, среднепахотных, среднесуглинистых (Glossic Antric Retisol (Loamic)) почвах: площадка № 2 «Многолетние травы» (56.03961 С.Ш., 37.16649 В.Д.) расположена на поле с многолетними злаковыми травами 2-го года использования, площадка №6 «Пар» (56.04163 С.Ш., 37.17686 В.Д.) – на поле, находившемся в 2022-2023 гг. под паром.

Во всех разрезах и полуяхмах были отобраны образцы на плотность методом режущих колец (ГОСТ 5180-2015) цилиндром объемом 100 см³ в 2-х кратной повторности из слоев 0-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70, 70-90, 90-110 см в разрезах и с таким же шагом, но до 50 см – в полуяхмах. Из этих же слоев отобраны образцы для определения других физических, химических и микробиологических свойств.

Перед проведением анализов образцы почв доводили до воздушно-сухого состояния, измельчали и просеивали через сито 2 мм, удаляли корни.

Гранулометрический состав определяли на лазерном дифрактометре Microtrac Bluewave (Microtrac, США). рН водной вытяжки измеряли при соотношении почва : вода = 1:2,5 потенциометрическим методом с помощью иономера «Эком-211» (НПП «Эконикс»). Содержание общего углерода, который в исследованных почвах представлен углеродом органического вещества (C_{орг}), устанавливали методом сухого сжигания с использованием экспресс-анализатора на углерод АН-7529М (Республика Беларусь). Рассчитывали запасы C_{орг} по формуле:

$$Q = C \times h \times \rho, \quad (1)$$

где Q – запас углерода, т C·га⁻¹; C – содержание C_{орг}, %; h – мощность горизонта, см; ρ – плотность сложения, г·см⁻³.

Микробиологические характеристики почв определяли кинетическими методами по выделению CO₂, количество которого анализировали на газовом хроматографе Кристаллюкс 4000М (НПФ «Мета-хром», Йошкар-Ола, Россия) с детектором по теплопроводности. Навески воздушно-сухой почвы массой 2 г, в трехкратной повторности для каждого образца, помещали во флакон объемом 15 см³, увлажняли до 60% полной влагоемкости и предынкубировали в эксикаторе над дистиллированной водой в течение пяти суток (ISO 18400-206) при комнатной температуре, составлявшей 22°C. Базальное дыхание (БД) оценивали по выделению CO₂ нативной почвой за 23-24 часа инкубации (ISO 16072-2002), выражали в мкг C-CO₂·г⁻¹·ч⁻¹. Содержание углерода микробной биомассы (C_{мик}) почв определяли в тех же образцах методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД) при добавлении к почве раствора глюкозы (0,2 мл) с концентрацией 10 мг·г⁻¹ сухой почвы. Время инкубации 2-3 часа. C_{мик} (мкг·г⁻¹) рассчитывали по формуле из работы (Andersen, Domsh, 1978). Для верхнего 30-сантиметрового слоя почвы рассчитывали запасы микробного углерода по формуле (1), где C – содержание C_{мик}, %.

Потенциальную микробную продукцию CO_2 оценивали по формуле:

$$\text{МП} = \frac{V_{\text{bas}} \cdot m_{\text{п}} \cdot 24}{1000000}, \quad (2)$$

где МП — микробная продукция CO_2 , $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, V_{bas} — базальное дыхание почв, $\text{мкг С} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$, $m_{\text{п}}$ — масса почвы из расчета на мощность 10 см на площади 1 м^2 , г, 1000000 — коэффициент, учитывающий перевод мкг в г. Для оценки продукции CO_2 слоем 0-30 см складывали данные для 0-10, 10-20 и 20-30 см.

Статистическую обработку данных проводили в программе Statistica 8.0. Соответствие данных нормальному распределению устанавливалось по критерию Шапиро-Уилка. Для данных, не подчиняющихся нормальному распределению, применяли методы непараметрической статистики. Сравнение данных для почв разных площадок проводилось по U-тесту Манна-Уитни. Оценка связей между показателями устанавливалась на основе рангового коэффициента корреляции Спирмена (r_s). Статистические гипотезы проверялись с уровнем значимости равным 0,05.

Результаты и обсуждение

Физические, физико-химические и химические свойства горизонтов почв

Во всех исследованных почвах наименее плотными были верхние гумусовые горизонты. Серогумусовые горизонты почв под лесом и лугом характеризовались средней плотностью $1,06 \pm 0,05$ и $1,06 \pm 0,16$ (\pm стандартное отклонение) $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$, агрогумусовые горизонты почв под паром — $1,12 \pm 0,15$ и под многолетними травами — $1,25 \pm 0,04$ $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$. С глубиной плотность увеличивалась: средние величины в иллювиальных горизонтах естественных почв составляли 1,52-1,58, агропочв — 1,63-1,65 $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$.

Серогумусовые и агрогумусовые горизонты почв всех исследованных площадок имели среднесуглинистый гранулометрический состав (за исключением тяжелосуглинистого состава, обнаруженного в одной из полуям на лугу). Содержание физической глины в почве лесной площадки убывало вниз по профилю, почвообразующей породой здесь выступали песчаные отложения. В почве луга облегчение гранулометрического состава наблюдалось только в элювиальной части профиля. Весь профиль агропочвы под паром был среднесуглинистым, с небольшим снижением содержания физической глины в осветленных горизонтах и резким — в переходном к породе слое, в котором с глубины 100 см были обнаружены супесчаные отложения. Агропочва под многолетними травами характеризовалась тяжелосуглинистым гранулометрическим составом срединной части профиля из-за формирования на глинистой почвообразующей породе.

Среди исследованных почв наиболее кислой реакцией среды характеризовался серогумусовый горизонт почвы лесной площадки: $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ $4,44 \pm 0,15$. Слабокислыми были серогумусовый горизонт почвы площадки под лугом, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ $5,89 \pm 0,30$, и агрогумусовый горизонт почвы под паром, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ $6,02 \pm 0,45$. Агрогумусовый

горизонт почвы под многолетними травами имел самый высокий рН среди верхних горизонтов – $6,46 \pm 0,20$. В естественных почвах рН постепенно увеличивался с глубиной, примерно на одну единицу в самых нижних горизонтах. В агропочвах рН слабо варьировал в пределах 0,3-0,4 единиц до глубины 50-70 см и снижался в иллювиальных и переходных к породе горизонтах.

Естественные и агропочвы различались по характеру распределения содержания углерода органического вещества. В верхнем 10-сантиметровом слое содержание $C_{орг}$ уменьшалось от почв под лесом (2,59%) к почвам под лугом (2,50%), агропочвам под паром (2,27%) и под многолетними травами (2,12%). В естественных почвах содержание $C_{орг}$ снижалось с глубиной более резко, чем в агропочвах. В пределах серогумусового горизонта на глубине 10-20 см $C_{орг}$ было в 1,4-1,5 раз меньше по сравнению с верхними десятью сантиметрами, тогда как в агрогумусовых горизонтах его содержание не изменялось. Наиболее сильное уменьшение количества $C_{орг}$ с глубиной наблюдалось в почве лесной площадки: в гумусово-элювиальном горизонте на глубине 20-30 см $C_{орг}$ было в 3 раза меньше, чем в верхних десяти сантиметрах. Снижение в почвах остальных площадок было более плавным – в 1,1-1,5 раза. Иллювиальные и подстилающие их горизонты разных площадок характеризовались близким содержанием $C_{орг}$ – в среднем 0,21-0,38%.

Профильные и пространственные закономерности микробиологических свойств почв

Наибольшее содержание углерода микробной биомассы ($C_{мик}$) наблюдалось в верхних 10 см почв и значительно снижалось вниз по профилю. Самое высокое $C_{мик}$ было в почвах под лугом – в среднем 518 ± 185 $мкг \cdot г^{-1}$, а самое низкое – в почвах под лесом 167 ± 45 $мкг \cdot г^{-1}$. В агропочвах отмечалось среднее содержание $C_{мик}$, составляющее в слое 0-10 см 194 ± 61 $мкг \cdot г^{-1}$ на площадке «Пар» и 383 ± 35 $мкг \cdot г^{-1}$ на площадке «Многолетние травы». На всех площадках, кроме лесной, количество $C_{мик}$ в слое 0-30 см составляло сотни $мкг/кг$, а ниже – всего десятки и даже единицы $мкг \cdot г^{-1}$. В лесу содержание $C_{мик}$ уже на глубине 10-20 см серогумусового горизонта уменьшалось до 71 ± 19 $мкг \cdot г^{-1}$. Отличия $C_{мик}$ в почвах лесной площадки от других были статистически значимы.

Доля углерода микробной биомассы в общем углероде органического вещества почв ($C_{мик}/C_{орг}$) была, как правило, выше в верхних 30-ти см по сравнению с остальной частью профиля. Наименьшей она оказалась в почвах лесной площадки ($0,6 \pm 0,1\%$) и агропочвах площадки под паром ($0,8 \pm 0,1\%$). В почвах под лугом и агропочвах под многолетними травами $C_{мик}/C_{орг}$ было близким – $1,3 \pm 0,2\%$ и $1,5 \pm 0,8\%$, соответственно. В толще почвы с 30-110 см $C_{мик}/C_{орг}$ снижалось в 1,5-2,3 раза. Из работы (Иващенко, 2017) также известно, что $C_{мик}/C_{орг}$ в гумусовых горизонтах дерново-подзолистых почв под лугом было выше, чем в под лесом и под пашней.

Интенсивность базального дыхания (БД) была наибольшей в верхних 10-ти сантиметрах гумусовых горизонтов почв. Статистически значимо отличающиеся наибольшие величины БД наблюдались в почвах под лугом ($2,07 \pm 0,48$ мкг С-СО₂·г⁻¹·ч⁻¹), уменьшались в лесных почвах – $1,25 \pm 0,27$ мкг С-СО₂·г⁻¹·ч⁻¹ и были минимальными в агропочвах – $0,81-0,90$ мкг С-СО₂·г⁻¹·ч⁻¹. Аналогично С_{мик}, интенсивность БД снижалась с глубиной. В части почвенного профиля ниже 30 см значения БД варьировали в диапазоне от 0,02 до 0,18 мкг С-СО₂·г⁻¹·ч⁻¹.

Для оценки микробного дыхания как источника почвенного СО₂ была рассчитана потенциальная микробная продукция СО₂. Оценка проводилась для верхнего 30-ти сантиметрового слоя почв, так как именно этот слой характеризуется высокой биологической активностью и имеет наибольшее значение для газообмена с атмосферой. В середине летнего периода больше всего продуцировали СО₂ почвы суходольного разнотравного луга – $10,6$ гС·м⁻²·сут⁻¹. Микробная продукция СО₂ агропочвами составила $7,2$ гС·м⁻²·сут⁻¹ на площадке под паром и $5,9$ гС·м⁻²·сут⁻¹ – под многолетними травами. Меньше всего образовывалось СО₂ в ельнике папоротниково-снытиево-кисличном – $5,4$ гС·м⁻²·сут⁻¹.

Корреляционная зависимость микробиологических характеристик от почвенных свойств

Установлена высокая корреляционная связь БД и С_{мик} с содержанием углерода органического вещества в разрезах по всем площадкам ($r_s = +0,88$ и $+0,81$ соответственно, $n=28$, $p<0.05$). Наиболее тесное влияние содержания органического вещества на микробные показатели подтверждает большинство исследований (Ананьева и др., 2009; Иващенко, 2017; Курганова, 2010; Завьялова и др., 2020).

Для горизонтов 0-30 см обнаружены положительная слабая корреляционная связь С_{мик} с рН_{Н2О} и средняя корреляционная связь с содержанием физической глины: $r_s = 0,40$ и $0,56$, $n=36$, $p<0.05$. При более низком рН_{Н2О} в почвах леса отмечены наиболее низкий С_{мик} в силу того, что почвенные микробы в кислых почвах большую долю энергии перенаправляют с роста на поддержание жизнедеятельности (Sawada et al., 2009). Большее количество физической глины повышает удельную поверхность почв, что в свою очередь способствует размещению большего количества микроорганизмов. Интенсивность БД отрицательно коррелировала с плотностью сложения верхних горизонтов почв: $r_s = -0,70$, $n=36$, $p<0.05$. Повышенная плотность горизонтов ухудшает аэрацию почв и условия функционирования микроорганизмов.

Запасы углерода органического вещества и микробной биомассы почв естественных и агроэкосистем

Запасы С_{орг} в верхнем 30-ти см слое почв уменьшались от агропочв к естественным в ряду: почвы под паром ($75,6$ т/га) – почвы под многолетними травами ($72,7$ т/га) – почвы под лугом ($65,0$ т/га) – почвы под лесом ($59,4$ т/га). Доля запасов С_{орг} в верхних 30-ти см почв от запасов всего почвенного профиля

составляли 69% в почвах леса, 77% – в агропочвах под паром, 80% – в агропочвах под многолетними травами и 81% – в почвах луга. В работе Кургановой с соавторами для дерново-подзолистых почв Калужской области также отмечены большие запасы $S_{орг}$ на пашне по сравнению с лесными почвами (Курганова и др., 2022).

Запасы $S_{мик}$, рассчитанные для верхнего 30-ти см слоя почв, убывали в ряду: почвы под лугом ($1,2 \text{ т С} \cdot \text{га}^{-1}$) – почвы под многолетними травами ($1,0 \text{ т С} \cdot \text{га}^{-1}$) – почвы под паром ($0,6 \text{ т С} \cdot \text{га}^{-1}$) – почвы под лесом ($0,3 \text{ т С} \cdot \text{га}^{-1}$). Наибольший вклад $S_{мик}$ вносит в запасы углерода органического вещества в верхнем 30-сантиметровом слое в почвах луга (1,8%), ниже вклад в агропочве под многолетними травами (1,4%) и под паром (0,8%). Наименьший вклад $S_{мик}$ в общие запасы углерода установлен в почвах под лесом – 0,5%.

Выводы

Базальное дыхание и содержание углерода микробной биомассы были наибольшими в верхних 30-ти см почвенного профиля, с максимумом в слое 0-10 см, что обуславливает значимость мониторинга микробиологических характеристик на данных глубинах почв. Уменьшение показателей вниз по профилю связано со снижением содержания органического вещества и повышением плотности нижних горизонтов почв, что подтверждается корреляционными зависимостями.

Рассчитанные запасы углерода микробной биомассы $S_{мик}$ и потенциальная микробная продукция CO_2 для верхнего 30-ти сантиметрового слоя почв в середине лета были наибольшими в почвах суходольного разнотравного луга ($1,2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$; $10,6 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$), наименьшие – в почвах ельника папоротниково-снытьево-кисличного ($0,3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$; $5,4 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$). Данные показатели в агропочвах под многолетними травами и паром имели промежуточные значения, при этом для них были характерны наибольшие запасы углерода органического вещества ($72,7\text{-}75,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$). В естественных почвах луга отмечено наибольшее отношение запасов $S_{мик}$ к запасам $S_{орг}$ в слое 0-30 см (1,8%), наименьшее – в почвах леса (0,5%). Установлено, что вклад $S_{мик}$ в $S_{орг}$ в агропочве под многолетними травами (1,4%) был выше, чем в агропочве под паром (0,8%).

Таким образом, охарактеризованы начальные показатели микробного дыхания, соотношение запасов микробного и общего углерода для последующего многолетнего мониторинга составляющих углеродного баланса экосистем карбонового полигона «Чашниково».

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800147-0 «Почвенные информационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов») и

Программы создания и функционирования карбонового полигона Московской области «Чашниково».

Благодарность

Авторы благодарят сотрудников проекта SoilText Почвенного института им. В.В. Докучаева за возможность определения гранулометрического состава почвенных образцов на лазерном дифрактометре Microtrac Bluewave, В.П. Самсонову за консультации, а также сотрудников факультета почвоведения МГУ, принимавших участие в описании площадок и отборе образцов.

Литература

- Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Рыжова И.М., Бочарникова Е.О., Стольникова Е.В. (2009) Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокиси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биогеоценозов и коренных ельников южной тайги (Костромская область). *Почвоведение*. **9**, 1108-1116.
- Завьялова Н.Е., Ковалевская Н.П., Шаравин Д.Ю. (2020) Влияние длительного применения минеральных удобрений на экофизиологические показатели микробоценозов дерново-подзолистой почвы Предуралья. *Агрохимия*. **1**, 3-8.
- Ивашенко К.В. (2017) Обилие и дыхательная активность микробного сообщества почвы при антропогенном преобразовании наземных экосистем. [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. биол. наук (03.02.03) – Пушкино. 205 С.
- Ивашенко К.В., Ананьева Н.Д., Васенев В.И. и др. (2014) Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область). *Почвоведение*. **9**, 1077-1088.
- Ильясов Д.В., Молчанов А.Г., Глаголев М.В. и др. (2020) Моделирование нетто-экосистемного обмена диоксида углерода сенокоса на осушенной торфяной почве: анализ сценариев использования. *Компьютерные исследования и моделирование*. **12:6**, 1427-1449
- Карбоновые полигоны Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://carbon-polygons.ru/> (дата обращения: 15.01.2024)
- Классификация и диагностика почв России /Л. Л. Шишов и др. - Смоленск: Ойкумена, 2004. - 341 с.
- Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А. и др. (2007) Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука.
- Курганова И.Н. (2010) Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России: диссертация докт. биол. наук. – Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова

- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. (2022) Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности. *Почвы и окружающая среда*. **5:2**, 169. DOI: 10.31251/pos.v5i2.169
- Приказ Минобрнауки России от 5 февраля 2021 г. № 74 «О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса».
- Смагин А.В. (2005) Газовая фаза почв. М.: Изд-во МГУ
- Anderson T.H., Domsh K.H. (1978) A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil. *Soil Biol. Biochem.* **10**, 215–221.
- Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T. (2004) A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Glob. Change Biol.* **10**, 1756-1766
- Sawada K., Funakawa S., Kosaki T. (2009) Different effects of pH on microbial biomass carbon and metabolic quotients by fumigation–extraction and substrate-induced respiration methods in soils under different climatic conditions. *Soil Science and Plant Nutrition.* **55:3**, 363-374, DOI: 10.1111/j.1747-0765.2009.00378.x
- Susyan E.A., Wirth S., Ananyeva N.D., et. al. (2011) Forest succession on abandoned arable soils in European Russia - Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity. *European Journal of Soil Biology.* **47**, 169-174.

УДК 614.76

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МАРКЕРНЫХ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ УГЛЕДОБЫЧИ КОМПОНЕНТОВ В НАТИВНЫХ ПОЧВАХ И ИСКУССТВЕННЫХ СУБСТРАТАХ

Евдокимова М.В.¹, Горленко А.С.¹, Прудникова Е.В.¹, Калита М.М.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
soil.resources@mail.ru

Evdokimova M.V., Gorlenko A.S., Prudnikova E.V., Kalita M.M.
Lomonosov Moscow State University

Annotation: A scientific substantiation of the environmentally safe proportion of coal dust and marker substance in native soil (Taiga gley peaty-humic) was carried out, modeling the transfer of the dusty coal fraction and marker substance through the air, its deposition on the soil surface and the redistribution of toxicants in its profile, based on the interpretation of the environmental condition by measuring biological indicators of soil cover. Threshold values of the content in fractions of coal dust and marker components in the soil in the form of their resulting concentration (in mg/kg) have been determined.

Введение

Современные подходы к оценке качества почв основаны, прежде всего, на определении биологических показателей, контроль за которыми в практическом плане обеспечивается наличием метрологически аттестованных методик биодиагностики (Терехова, 2011; Терехова и др., 2023). Результаты определения химического состава почв без исследования их биологического состояния, как известно, отражают лишь наличие геохимических аномалий (Геохимия окружающей среды, 1990) и определенных «маркеров» – индикаторных характеристик, выбираемых из полного набора параметров как наиболее показательных по отношению к оценке состояния окружающей среды (Наилучшие доступные технологии, 2016), что имеет крайне ограниченное значение для прогноза и оценки состояния экосистемы в целом (Максимов, 1991; Левич, 1994). В этой связи разработаны способы предварительного отражения биологических откликов в ответ на антропогенное воздействие стрессоров на безразмерную шкалу, которая служит основой экологического нормирования (Глазунов и др., 2018), а также подходы к интерпретации экспериментальных зависимостей вида «доза-эффект» с использованием шкал желательности (Воробейчик и др., 1994).

Методы биотестирования и биоиндикации обычно сводятся к количественному исследованию зависимости роста (при фиксированном времени наблюдения) от уровней воздействия (нагрузки). Количественная оценка изменений жизненных проявлений почвенной биоты, позволяющая описать связи между абиотическими

факторами и биологическими откликами, служит мерой антропогенной нагрузки на почву. Полная поверхность биологического отклика на воздействие ведущего компонента субстрата представляет собой деформированный колокол (отклик является функцией двух переменных – времени и концентрации маркерных компонентов в субстрате) (Глазунов и др., 2018). На практике обычно имеют дело с сечениями этой поверхности либо при фиксированных значениях концентрации ведущего компонента субстрата, то есть кривыми полной динамики биологического отклика (полная кривая роста), либо при фиксированных значениях времени – кривыми биологического отклика на воздействие (Глазунов и др., 2018).

К основным методам оценки экологического состояния почвы, находящейся под воздействием нагрузки, относятся методы определения ферментативной активности и интенсивности дыхания почвы (Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв, 1984). Из предложенных «Временными методическими рекомендациями...» (1984) методов оценки биологических свойств почвы измерение почвенного дыхания отличается наибольшей относительной простотой и точностью метода определения активности почвенной биоты (Ananyeva et al., 2008; Бакунович и др., 2016).

Подход к моделированию загрязнения почв маркерными для объектов негативного воздействия на окружающую среду химическими веществами путем создания в лабораторных условиях искусственных смесей с нативными почвами или почвогрунтами не является новым (Бакунович и др., 2016; Горленко и др., 2022, Золотарева, Плеханова, 2024). Создание обширной линейки загрязнения почв обеспечивает возможность получения полной кривой «доза-эффект», воссоздавая таким образом весь диапазон концентраций загрязняющих веществ от их минимальных количеств, вызывающих эффект гормезиса, вплоть до их аномального содержания, приводящего к крайней степени угнетения биотестов.

Почва по-прежнему остается единственным в числе прочих компонентом окружающей среды, охрана которого не прописана в природоохранном законодательстве на уровне федерального закона (Яковлев и др., 2023). Не разработаны также и нормативы качества почв, как компонента окружающей среды, поэтому вопрос разработки нормативов качества почв остается актуальным.

Объекты и методы

Антропогенное воздействие на окружающую среду на объектах добычи каменного угля связано с изъятием вещества (угля и горных пород) и его привнесом в природные среды (выбросы, сбросы, отвалы, складирование готовой продукции) (Семикобыла, Добровольский, 2011; Семенов и др., 2023). Угольная пыль является источником поступления в окружающую среду мышьяка, кадмия, хрома, меди, ртути, никеля, свинца и никеля (Семикобыла, Добровольский, 2011; Семенов и др., 2023). Формирование геохимического загрязнения почв в окрестностях объектов

угледобычи происходит прежде всего за счет поступления угольной и породной пыли в атмосферный воздух (Семикобыла, Добровольский, 2011). Перенос угольной пыли осуществляется по воздуху непосредственно с мест складирования угля и при осуществлении взрывных работ на разрезах и в шахтах. Для почв, находящихся вблизи терриконов угольных шахт характерно повышенное содержание соединений тяжелых металлов и металлоидов (Co, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn), а также серы (S) (Семенов и др., 2023).

В рамках полевых исследований 2023 г. в окрестностях объектов добычи каменного угля была заложена 51 пробная площадка. На каждой пробной площадке с глубины 0-5 см было отобрано по одной смешанной пробе из верхнего гумусового горизонта почв. На большинстве пробных площадок были вскрыты глееземы слабоглеевые гумусово-перегнойные таежные.

Для оценки токсичности пыли каменного угля Ургальского месторождения были приготовлены искусственные смеси с образцами фоновой почвы с известным содержанием маркерных загрязняющих веществ (Табл. 1). Фоновой почвой послужил образец глеезема слабоглеевого гумусово-перегнойного таежного. Токсичность образцов оценивали по биологическим откликам – базального дыхания, субстрат-индуцированного дыхания и углерода микробной биомассы (Ananyeva et al., 2008) – на результирующую концентрацию тяжелых металлов и металлоидов (мг/кг) в почве.

Содержание тяжелых металлов в почве определяли методом ИСП-ОЭС (М-МВИ-80-2008) на оптико-эмиссионном спектрометре. Набор определенных в рамках количественного химического анализа элементов в искусственных смесях был аналогичным тому комплексу загрязняющих веществ, которые определяли в нативных почвах (Табл. 1).

Таблица 1. Содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов и металлоидов в почве и угольной пыли (мг/кг), и их кислотность (ед. pH)

Образец	Pb	Hg	Zn	Cr	Cu	V	Ni	Cd	Co	Fe	Mn	As	Sr	Z ^{***}	pH
почва	29,	0,0	68,	3,	13,	18,	4,	<	3,	1128	374,	1,	7,6	14,	6,
*	5	4	5	6	0	2	0	1	4	7	5	8		0	2
пыль*	15	0,0	20,	3,	8,4	18,	2,	<	3,	8062	126,	1,	24,	9,7	9,
*		2	0	1		8	0	1	3		8	5	2		0

Для анализа закономерностей биологического отклика на содержание пыли каменного угля в смеси с нативной почвой (глееземы слабоглеевые гумусово-перегнойные таежные), а также комплекса тяжелых металлов в нативной почве, как основы оценки воздействия объектов добычи каменного угля на экологическое

состояние природной среды, были исследованы закономерности изменения интенсивности эмиссии углекислого газа из почвы и искусственных субстратов. Использование макрокинетической модели микробного роста на многокомпонентном субстрате (Гендугов, Глазунов, 2014) обеспечило основу для количественного исследования полной кривой биологического отклика на воздействие компонентов субстрата в составе смеси угольной пыли с нативной почвой и, собственно, в нативной почве (при фиксированном времени наблюдения за ростом):

$$q = Ae^{-K/z} z^{-B} \quad (1).$$

В этом уравнении A – коэффициент, масштабирующий биотический показатель q , K – коэффициент «скорости» увеличения биотического показателя q в результате увеличения результирующей концентрации z тяжелых металлов и металлоидов в почве, B – коэффициент «скорости» убывания биотического показателя q в ответ на увеличение результирующей концентрации компонентов субстрата z .

Результирующая концентрация тяжелых металлов и металлоидов в почве (мг/кг) рассчитана в форме геометрического среднего:

$$z = \sqrt[n]{\prod c_i},$$

где n – число учтенных компонентов и c_i – концентрация i – го вещества в почве, мг/кг.

Коэффициенты модели (1) получены приближением этих уравнений к экспериментальным данным способом наименьших квадратов с использованием алгоритма, созданного на языке Python 3. Исследование кривой отклика методами математического анализа с использованием производных первого, второго и третьего порядков позволило установить и содержательно интерпретировать особые точки кривой биологического отклика на воздействие. Особые точки модели (1) рассчитаны с использованием пакета программ компьютерной алгебры Maxima. Точности модели (1) оценивали по параметру корня средней квадратичной ошибки (RMSE), который является показателем эффективности для модели и измеряет среднюю разницу между значениями, спрогнозированными моделью, и фактическими значениями.

Обобщение откликов почвенного микробного сообщества на загрязнение провели путем нормирования показателей их значениями в точке максимума функции (1): $x = z/z_4$ и $y = q/q_4$ соответственно.

Ранжирование качества почв по закономерностям обобщенного отклика почвенного микробного сообщества $y = q/q_4$ на загрязнение почв $x = z/z_4$, провели на основе показателя состояния p (Глазунов и др., 2018):

$$p = \gamma e^{-\alpha/y}, \quad (2)$$

где y – показатель отклика на нагрузку; α и γ – коэффициенты, определяемые решением системы из двух уравнений (2) для пары значений отклика y обобщенной функции «доза-эффект», одно из которых получено для максимальной нагрузки x_0 , не выводящей почву из состояния нормы, а второе – для минимальной нагрузки x^* , гарантированно выводящей ее за пределы возможности самовосстановления. Коэффициенты уравнения (2) получены с использованием пакета программ компьютерной алгебры Maxima.

Результаты и обсуждение

Использование макрокинетической модели микробного роста на многокомпонентном субстрате (Гендугов, Глазунов, 2014) обеспечило основу для количественного исследования полной кривой биологического отклика на воздействие компонентов субстрата в составе смеси угольной пыли с нативной почвой (Табл. 2, Рис. 1) и, собственно, в нативной почве (Рис. 2) (при фиксированном времени наблюдения за ростом).

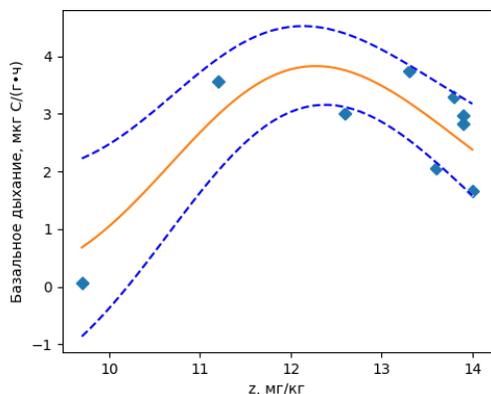
Таблица 2. Параметры и особые точки уравнения модели (1) зависимости базального дыхания, субстрат-индуцированного дыхания и углерода микробной биомассы от результирующей концентрации тяжелых металлов и металлоидов (мг/кг) в искусственных

С											
Λ	В	К	RMSE*	z_1	$\frac{M}{z_2}$	z_3	z_4	z_5	z_6	q_4	q_4/z_4
Базальное дыхание, мкг С/(г•ч)											
1,7E+88	57,54	706,28	0,67	9,6	10,7	12,0	12,3	13,9	15,2	3,8	0,31
Субстрат-индуцированное дыхание, мкг С/(г•ч)											
3,6E+66	42,66	544,79	1,24	9,6	10,8	12,4	12,8	14,7	16,3	7,0	0,55
Углерод микробной биомассы, мкг С/г почвы											
1,1E+68	42,58	543,80	49,84	9,6	10,8	12,4	12,8	14,7	16,3	279,3	21,87
Обобщение всех откликов, б/р											
1,2E+22	50,98	50,85	0,17	0,77	0,86	0,97	1,00	1,13	1,25	1,0	1,01

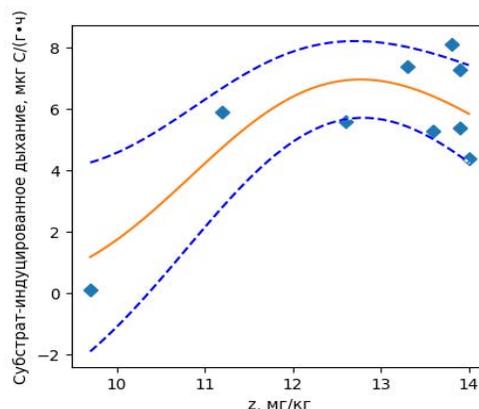
В точке z_4 происходит смена стимулирующего действия (область малых концентраций) на угнетающее действие металлов (проявление токсического

эффекта). Концентрация $z_4 = 12$ мг/кг является допустимой по показателям микробиологической активности в смесях.

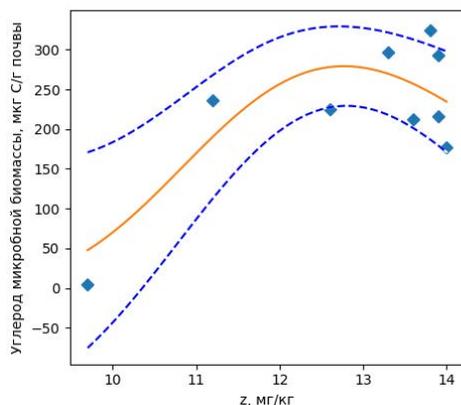
а)



б)



в)



г)

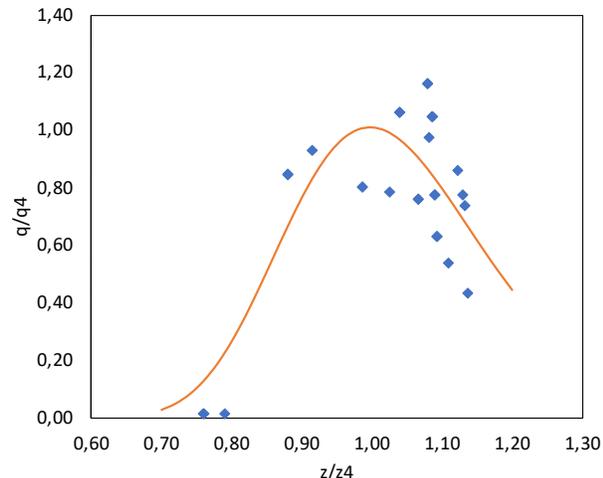


Рис. 1. Отклик микробного роста на результирующую концентрацию z в смесях с угольной пылью: а) уровень базального дыхания; б) уровень субстрат-индуцированного дыхания; в) углерод микробной биомассы почвы; г) в обобщенном для всех откликов виде; ромбы – эксперимент, сплошная линия – по уравнению (1), пунктир – доверительные пояса модели.

Переход от безразмерных величин x (Табл. 2, Рис 1 г) к показателям концентрации тяжелых металлов в почве можно осуществить, используя для пересчета значения таковых в особой точке z_4 , полученные в результате анализа

кривых индивидуальных откликов. Опыты с добавлением угольной пыли в нативную почву позволили заключить, что внесение угольной пыли в количестве 30–40 % вызывает достоверное снижение почвенной микробиологической активности.

Проведенное нами научное обоснование экологически безопасной доли пыли каменного угля в почве, моделируя перенос пылевой фракции по воздуху, ее осаждение на поверхности почвы и перераспределение токсикантов в профиле, согласуется с современными научными представлениями на интерпретацию состояния окружающей среды по измерению биологических показателей почвенного покрова.

Экологическое нормирование содержания маркерных для объектов угледобычи компонентов в нативных почвах

График биологического отклика на результирующую концентрацию z в почвах в обобщенном для всех откликов виде (Рис. 2) представляет собой экстремальную кривую в виде деформированного колокола, которая стремится к нулю и при стремлении независимой переменной к нулю, и при ее стремлении к бесконечности. Они обладают тем же набором особых точек, приведенным в таблицах индивидуальных биологических откликов. Более того, в тех случаях, когда индивидуальные графики при переходе к переопределенной системе координат обобщаются (совпадают), они имеют одинаковые особые точки.

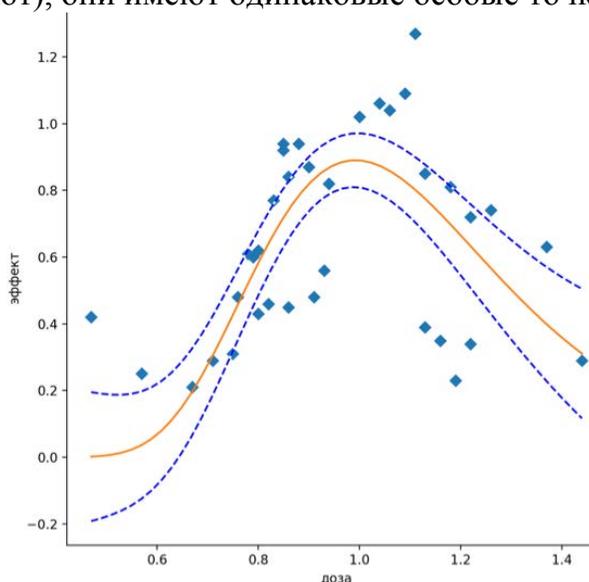


Рис. 2. Биологический отклик на результирующую концентрацию z в почвах окрестностей объектов добычи каменного угля в обобщенном для всех откликов виде; ромбы – эксперимент, сплошная линия – по уравнению (1), пунктир – доверительные пояса модели.

На основе пятиуровневой шкалы качества почвы и показателя ее состояния p провели ранжирование качества почв в окрестностях объектов добычи каменного угля (Табл. 3). На равномерной шкале показателя состояния p (2) с использованием коэффициентов $\alpha = -0,7$ и $\gamma = 0,114$ рассчитали недостающие значения отклика u для p , равного 0,5 и 0,75. Имея в виду, что угнетающее действие тяжелых металлов проявилось при концентрации x_4 , приняли эту величину за c_0 . Крайне неблагоприятное состояние биологической системы c_* соответствует особой точке x_6 , p в данном случае равно 1.

Таблица 3. Ранжирование качества почв по показателю состояния p , рассчитанного на основе обобщенного биологического отклика

Категория	Состояние	Концентрация	Описание
1	$0 \leq p < 0,25$	$0 < x \leq 0,99$	Недеградированные (ненарушенные)
2	$0,25 \leq p < 0,5$	$0,99 < c \leq 1,31$	Слабодеградированные
3	$0,5 \leq p < 0,75$	$1,31 < c \leq 1,39$	Среднедеградированные
4	$0,75 \leq p < 1$	$1,39 < c \leq 1,43$	Сильнодеградированные
5	$p = 1$	$c > 1,43$	Очень сильнодеградированные (разрушенные)

Отнесение нормированных концентраций z/z_4 к категориям качества на равномерной шкале показателя состояния p (2) позволило сделать вывод о том, что почвы прилегающих к основным структурным подразделениям предприятия по добыче каменного угля территориям, характеризуются преимущественно фоновым (ненарушенным) состоянием или слабодеградированы.

Выводы

Таким образом, результаты исследования состояния почв с использованием методов биотестирования и биоиндикации позволили установить пороговые уровни аэрогенного загрязнения почв. Полезным результатом обобщенных моделей явилась обратимость переходов от переопределенной системы координат к исходным показателям, и от особых точек обобщенной модели к индивидуальным особым точкам.

Обобщение на одной кривой разных откликов на загрязнение почв позволило получить полную кривую «доза-эффект». Тем самым была обоснована правомерность выбора ведущих компонентов субстрата (загрязняющих веществ почв).

Почвы прилегающих к основным структурным подразделениям предприятия по добыче каменного угля территорий характеризуются преимущественно фоновым (ненарушенным) и слабодegradированным состоянием.

Литература

- Бакунович Н.О., Хохлова О.С., Мякшина Т.Н., Русаков А.В., Шаповалов А.С. Загрязнение тяжелыми металлами и дыхательная активность микроорганизмов в нативных почвах и искусственных субстратах (на примере заповедного участка «Ямская степь»). *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2016. №85. С. 131 – 149.
- Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений. Екатеринбург: Наука. 1994. 280 с.
- Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв. Часть II. М.: Гидрометеиздат. 1984.
- Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Макрокинетическая модель микробного роста на многокомпонентном субстрате // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2014. № 3. С. 10-16.
- Геохимия окружающей среды/Ю. Е. Саэт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин и др. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Глазунов Г.П., Гендугов В.М., Яковлев А.С., Евдокимова М.В., Шестакова М.В. Научные основы экологической оценки состояния компонентов окружающей среды и нормирования их качества. МАКС Пресс Москва. 2018. 96 с.
- Горленко А.С., Воронина Л.В., Яковлев А.С., Поздняков Л.А., Федорова О.А. Оценка воздействия искусственного почвогрунта на основе отхода производства фосфорных удобрений (фосфогипса) на жизнедеятельность почвенных микроорганизмов // *Агрехимический вестник*. 2022. № 1. С. 59–67.
- Золотарева О. А., Плеханова И. О. Изменение целлюлозолитической активности и микробного дыхания почв разных типов в условиях загрязнения их тяжелыми металлам // *Агрехимия*. 2024. № 2. С. 10 – 18.
- Левич А.П. Биотическая концепция контроля природной среды // *Доклады РАН*. 1994. 337. №2. 280-282.
- М-МВИ-80-2008 Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии.
- Максимов В.Н. Ранговый метод оценки сходства сообществ при анализе состояния экосистем // *Экологические модификации и критерии экологического нормирования*. СПб.: Гидрометеиздат. 1991. С. 329-333.
- Наилучшие доступные технологии. Определение маркерных веществ в различных отраслях промышленности. Сборник статей 5. М.: Издательство «Перо», 2016. 68 с.

- Семенков И. Н., Шарапова А. В., Леднев С. А., Королева Т. В. Фракционный состав соединений металлов и серы в верхнем слое почв зон воздействия террикона угольной шахты (среднерусская лесостепь) // *Аридные экосистемы*. 2023. Т. 29, № 2(95). С. 118–127.
- Семикобыла Я.Г., Добровольский А.И. Прогноз экологической ситуации в горнопромышленном районе шахты Северная ОАО «Ургалуголь» с увеличением ее мощности // *Уголь*. 2011. № 2(1018). С. 66-71.
- Терехова В. А. Биотестирование почв: подходы и проблемы // *Почвоведение*. 2011. № 2. С. 190–198.
- Терехова В. А. и др. Методология биодиагностики почв и особенности некоторых методов биоиндикации и биотестирования (обзор) // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2023. № 2. С. 35–45.
- Яковлев А.С., Евдокимова М.В., Терехова В.А., Плеханова И.О., Дабахов М.В., Омелянюк Г.Г., Горленко А.С., Копельчук Н.В. Перспективы экологической оценки и нормирования качества почв и земель и управления их качеством // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2023. №4. С. 55-62.
- Ananyeva N.D., Susyan E.A., Chernova O.V., Wirth S. Microbial respiration activities of soils from different climatic regions of European Russia // *European Journal of Soil Biology*. 2008. № 44 (2), pp. 147–157.

УДК 631.421: 681.785.43

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОСТОЯНИЯ АГРОФИТОЦЕНОЗА В УСЛОВИЯХ ВСХОЛМЛЕННОГО РЕЛЬЕФА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

Железова С.В.¹, Иванов Д.А.²

¹ФГБНУ ВНИИФ, р.п. Большие Вязёмы, Российская Федерация
soferrum@mail.com

²ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (ВНИИМЗ),
г. Эммаусс, Российская Федерация
volok234@yandex.ru

IDENTIFICATION OF THE AGROPHYTOCENOSIS PATTERNS
IN CONDITIONS OF HILLY TERRAIN ACCORDING TO THE RESULTS
OF A COMPREHENSIVE INSTRUMENTAL RESEARCH

Zhelezova S.V.¹, Ivanov D.A.²

¹All-Russian Research Institute of Phytopathology, Bolshie Vyazemy, Moscow reg., Russia

²All-Russian Research Institute of reclaimed Lands – V.V. Dokuchaev Soil Science Institute
affiliation,
Emmaus, Russia

Annotation: In the field hilly condition there was shown the relationship between relief of soil surface, soil penetration resistance and vegetation index NDVI of perennial grasses, winter rye and spring wheat. At the early summer season it was demonstrated low negative correlation between soil penetration resistance and NDVI.

Введение

Для северо-западного региона России характерны всхолмленные ландшафты, сформированные под действием ледниковых и постледниковых процессов (Почвенно-геологические условия..., 1984), поэтому часто основой формирования почвенного покрова являются двучленные отложения. В таких условиях гранулометрический состав почвенного профиля и подстилающей породы может существенно изменяться на малых расстояниях, что оказывает решающее влияние на водно-физический режим почвы и её потенциальное плодородие (Шейн с соавт., 2022). Избыточное сезонное увлажнение, характерное для Нечерноземья, перераспределяясь на различных элементах рельефа, также вносит свою лепту в пестроту продуктивности агрофитоценоза (Иванов с соавт., 2019). В целом, сельскохозяйственные посевы чаще всего развиваются неравномерно, находясь под комплексным влиянием неоднородности почвенного покрова, элементов рельефа и дренажных систем. Для успешного разработки и внедрения перспективных

агротехнологий, в том числе технологий точного земледелия, необходимы сопряженные инструментальные обследования почвенных свойств и анализ состояния посевов во время вегетации.

Цель исследования: в ландшафтном профиле, пересекающем различные элементы рельефа конечно-моренной гряды, в пределах агроэкологической трансекты провести сопряжённые инструментальные исследования твёрдости почвы и оценку состояния посевов оптическими датчиками для оценки влияния местоположения в рельефе.

Объекты и методы

Место проведения и объекты исследования

Комплексное инструментальное обследование почвы и посевов было проведено на агрополигоне Губино ВНИИМЗ, в 4-х км к востоку от г. Тверь 20 мая 2023 г.. Многолетний опыт представляет собой агроэкологическую трансекту длиной 1300 м в пределах конечноморенного холма. Здесь Описание места исследования (Иванов с соавт, 2023): «Холм с относительной высотой 15 м, состоит из плоской вершины, северного, крутизной 2-3°, и южного (3-5°) склонов и межхолмных депрессий, северной и южной». Согласно данным Google Earth южный склон является более крутым (уклон в нижней части до 17%), северный склон пологий (1–8%) (рис. 1).



Рис.1. Ландшафтный профиль места расположения полигона многолетнего опыта (по данным Google Earth)

«Почвенный покров полигона – вариация-мозаика дерновоподзолистых глееватых и глеевых почв, образованная на двучленных отложениях – песчано-супесчаная толща в пределах почвенного профиля подстилается легко и среднесуглинистой закамененной мореной на разной глубине. На юге полигона мощность кроющего флювиогляциального наноса местами превышает 1,5 м. Почвы здесь преимущественно песчаные. На вершине и северном склоне холма поверхностные горизонты сложены супесью и иногда легким суглинком, мощность

кроющего наноса здесь колеблется около 1 м, а в межхолмной депрессии на севере морена изредка выходит на дневную поверхность» (Иванов с соавт., 2023). Также на территории агроландшафтного полигона заложена дренажная система с закрытым гончарным дренажем, дрены проходят на глубине 0,9–1,2 м и пересекают изучаемые трансекты с неодинаковой частотой в пространстве. В зависимости от крутизны склона междренные расстояния составляют от 18 м до 28 м.

В пределах указанной территории опыта было заложено три параллельные трансекты по сопряженному изучению твёрдости почв под посевами трёх культур (озимой ржи, многолетних трав 1 года пользования, яровой пшеницы) и измерению вегетационного индекса NDVI посевов при внесении и без внесения удобрений, а также для озимой ржи сравнивали азотный статус (Иванов с соавт., 2023). В каждой трансекте заложено по 30 точек опробования, расстояние между точками 40 м. Суммарно, для данного сопряженного исследования данные по состоянию посевов были получены в 90 точках для вариантов опыта без удобрения и в 90 точках для вариантов с удобрениями. Фазы развития культур: озимая рожь – выход в трубку; многолетние травы с клевером – весеннее отрастание, до цветения; яровая пшеница – всходы, 2-3 листа.

Методы исследования

Профильное измерение сопротивления вертикальной пенетрации почвы до глубины 61 см проводили прибором «Плотномер почвы цифровой SAS Soil S600», оснащённым GPS-приёмником, с точностью позиционирования до 5 м. Измерение вегетационного индекса NDVI посевов проводили с применением ручного оптического датчика GreenSeeker Handheld, азотный статус озимой ржи определяли по подфлаговому листу с применением отечественного прибора N-tester. Обработку результатов проводили в программах Excel MS Office и STATISTICA методами вариационной статистики, дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа.

Результаты и обсуждение

Оценка твёрдости почвы агрополигона

Твёрдость почвы оценивали по максимальной глубине проникновения плунжера (рис. 2) и по профильному распределению (рис. 3). Было показано, что местоположение в различных элементах рельефа оказывает существенное влияние на твёрдость почвы. Так, наименьшая глубина проникновения плунжера отмечена для южного склона, где на глубинах более 40 см выявлена самая высокая твёрдость почвы (рис. 3). Это обусловлено влиянием почвообразующей породы и включениями гравия. Наименьшая твёрдость почвы и наибольшая глубина проникновения плунжера отмечена на северном склоне. В целом, сопротивление

пенетрации почвы проявляет очень высокую вариабельность в условиях влияния почвообразующих пород ледниковых и постледниковых отложений (таблица 1).

Данные о твёрдости почвы (сопротивлении пенетрации) дают представление о почвенных условиях в каждой конкретной точке агроландшафтного профиля. Высокая вариабельность обусловлена влиянием почвообразующей породы и процессов эрозии, что в целом оказывает существенное влияние на плодородие почвы, и находит свой отклик в состоянии посевов в разных местах поля. Поскольку варьирование достаточно высокое как на малых расстояниях, так и по длине изучаемой трансекты, то была проведена процедура множественного регрессионного анализа, где в качестве влияющих на NDVI факторов было проверено влияние твёрдости в точке на разных глубинах и местоположения на склоне. Было выявлено, что достоверное влияние оказывает местоположение и усредненная по всему профилю (не слоями) твёрдость почвы, поэтому для дальнейшего сопоставления вегетационного индекса NDVI с условиями почвы данные были разделены на три группы по местоположению в ландшафте: юг, центр, север.

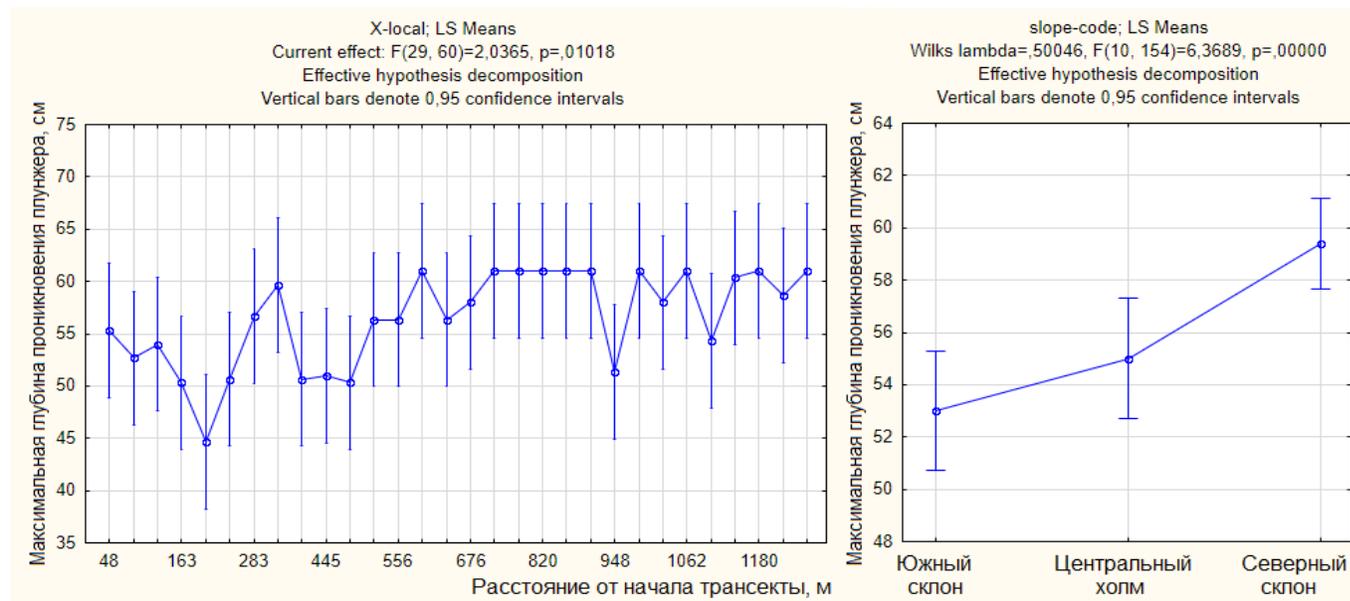


Рис. 2. Размах варьирования максимальной глубины проникновения плунжера твердомера: слева в учетных точках вдоль линии трансекты, справа – усредненные данные по элементам ландшафта. Планками погрешностей показаны 95%-ый доверительный интервал среднего.

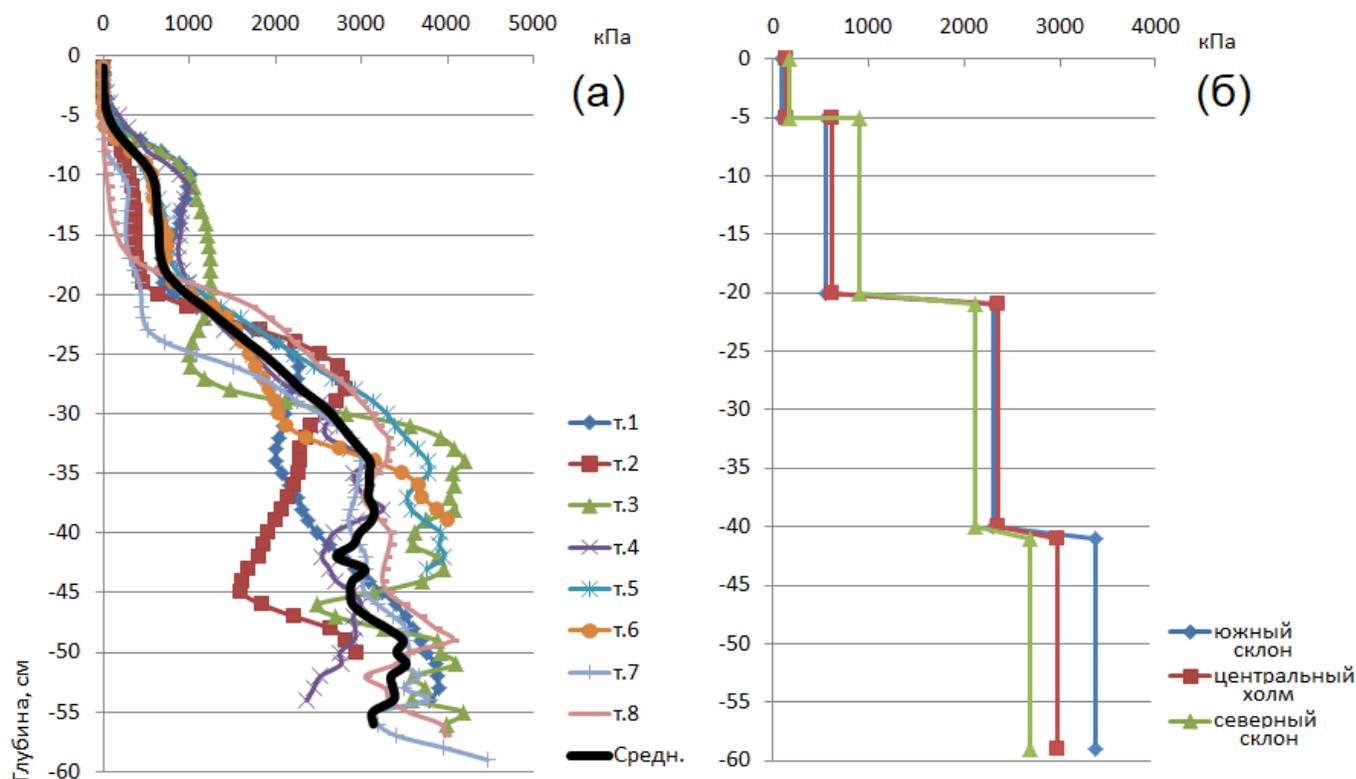


Рис. 3. Показатели сопротивления пенетрации (кПа) в профиле почвы: (а) пример профилей распределения сопротивления пенетрации в восьми точках опробования под посевами пшеницы на южном склоне моренного холма; (б) сопоставление усредненных показателей на разных элементах рельефа, изменение по слоям 0–5, 5–20, 21–40, 41–61 см

Таблица 1. Статистические характеристики твёрдости (кПа) в профиле дерново-подзолистой почвы на двучленных отложениях (Тверская область) (n=90)

Показатель	Среднее	Медиана	Min	Max	Станд. ошибка	Коэф-т вариации	Коэф-т асимметрии
Глубина проникн. плунжера, см	56	61	41	61	0,7	11,3	-1,07
Твёрдость почвы по слоям							
0–5 см	133	80	0	610	16,4	117,1	1,10
0–20 см	733	614	102	1857	44,1	57,1	0,87
20–40 см	2234	2138	1177	3677	60,5	25,7	0,35
40–60 см	2947	2978	1544	4439	66,2	21,3	-0,02
0–61 см, весь профиль почвы	1893	1869	1171	2730	38,8	19,5	0,12

Оценка состояния посевов по вегетационному индексу NDVI

Предварительно была оценена общая вариабельность показателя NDVI в зависимости от выращиваемой культуры, применения удобрений и местоположения в ландшафтном профиле (холм и склоны разной экспозиции). Достоверное повышение индекса NDVI показано на многолетних травах и озимой ржи на вариантах с применением удобрений. Яровая пшеница в момент обследования была в фазе всходов (2-3 листа), и варианты с удобрением и без удобрения по индексу NDVI не различались (рис. 4). Влияние склона на индекс NDVI было выявлено на уровне тенденции на вариантах опыта без удобрений: многолетние травы и рожь давали более высокую биомассу на склоне южной экспозиции.

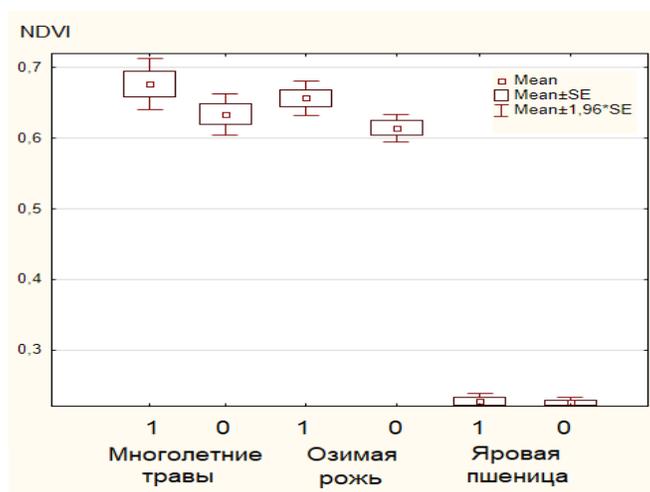


Рис. 4. Размах варьирования вегетационного индекса NDVI по сравниваемым вариантам опыта под тремя культурами 22 мая 2023 г, варианты: 0 – без удобрений, 1 – с удобрениями. Низкие показатели NDVI пшеницы обусловлены её начальной фазой развития (всходы, 2-3 листа).

При внесении удобрений сплошным равномерным фоном наблюдается общее повышение индекса NDVI, и в то же время, увеличивается варьирование этого показателя, связанное с влиянием всех вышеописанных условий. По результатам анализа всего массива данных выявлена слабая, но статистически значимая положительная корреляционная связь между NDVI по варианту без удобрений и NDVI по варианту с удобрением. Коэффициент корреляции в целом по массиву составил 0,34 ($p < 0,05$), а на южном склоне 0,82 ($p < 0,05$). Это свидетельствует о том, что вегетационный индекс NDVI без удобрений и при применении удобрений развивается симбатно на одних и тех же элементах рельефа. Абсолютные значения индекса не совпадают, но общая картина неоднородности развития растительности из-за влияния рельефа и почвы, сходна.

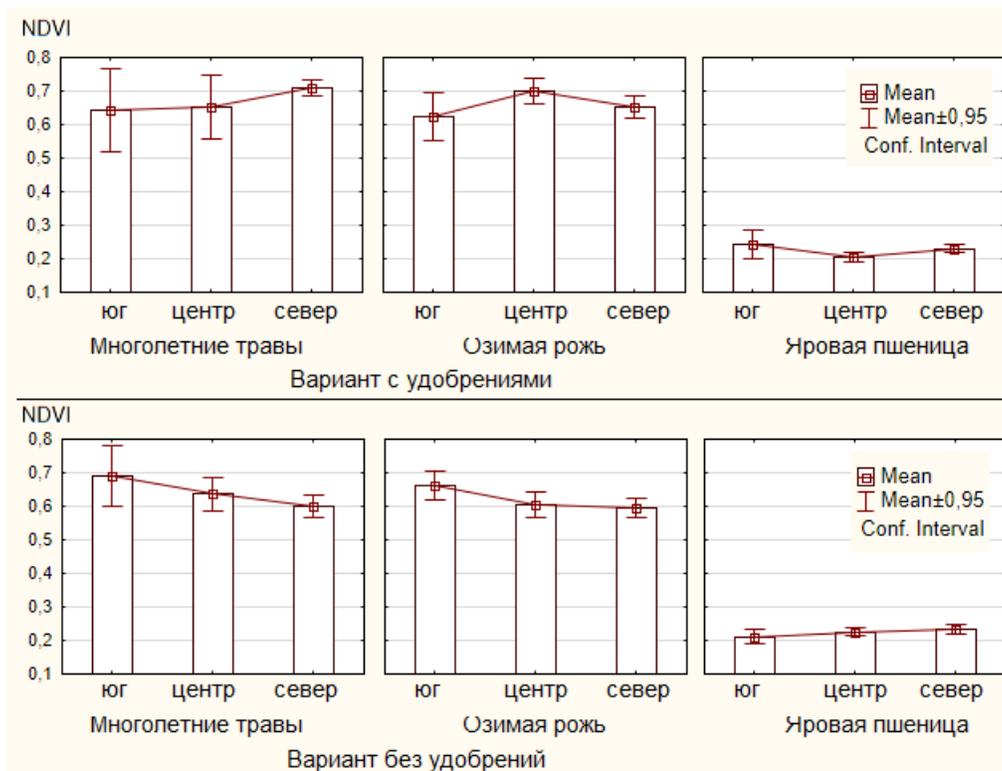


Рис. 5. Влияние местоположения в ландшафте на вегетационный индекс NDVI многолетних трав, озимой ржи и яровой пшеницы. Обозначения: юг, север – соответственно, склоны южной и северной экспозиции, центр – центральный холм

Связь твёрдости почвы с индексом NDVI возделываемых культур

Ожидалось, что изменение вегетационного индекса NDVI и твёрдости почвы будет сопряжено в пространстве. Однако было выявлено, что при данной схеме опробования и попытке найти зависимость для всей трансекты целиком не удастся выявить достоверной связи между твёрдостью почвы и NDVI. По результатам обработки пространственных данных было выявлено, что изменение этих показателей в пространстве подчиняется разным закономерностям. Так, показатель NDVI вдоль трансекты изменяется волнообразно, особенно по варианту без удобрения, и в данном случае достоверно выявляется регрессионная зависимость, связанная с местоположением в пространстве. Эта зависимость в целом по трансекте описывается полиномом пятого или шестого порядка (рис. 6, сверху). В то же время, для распределения твёрдости в пространстве всей трансекты не удастся достоверно подобрать уравнение регрессионной зависимости, т.к. был слишком большой разброс твёрдости на малых расстояниях (рис.6, внизу).

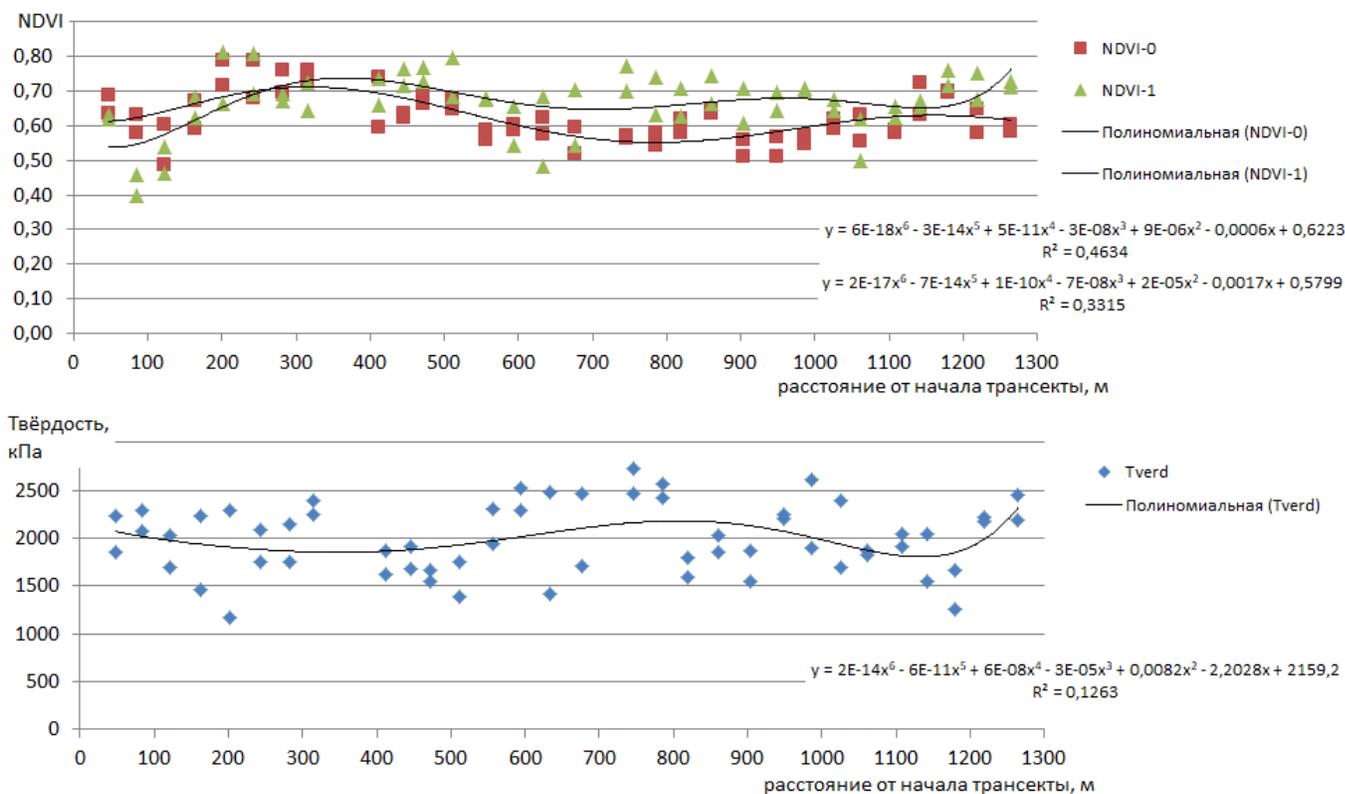


Рис. 6. Подбор уравнений регрессионной зависимости вегетационного индекса NDVI (вверху) и твёрдости (внизу) от расстояния. Обозначения: NDVI-0 – индекс NDVI на полосах опыта без удобрений, NDVI-1 – на полосах с удобрениями.

При рассмотрении отдельных элементов агроландшафтного профиля в пределах расстояний 300–500 м для центральной части трансекты и для северного склона выявляется достоверная отрицательная связь между твёрдостью почвы и индексом NDVI (рис. 7). Для южной части полигона не удается выявить такой достоверной связи. Это связано с тем, что на южном крутом склоне более сильное влияние на индекс NDVI оказывает сам рельеф, экспозиция склона, и степень смытости-намытости почвы, нежели подстилающая порода и твёрдость почвы.

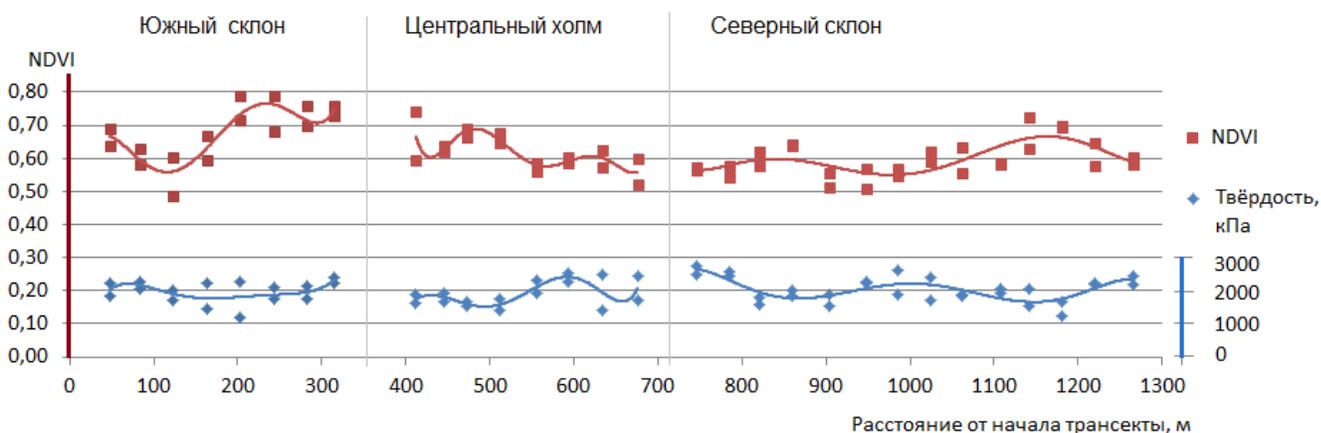


Рис. 7. Визуальное представление обратной зависимости вегетационного индекса NDVI (вверху) и твёрдости (внизу) от расстояния. Обозначения: NDVI-0 – индекс NDVI на полосах опыта без удобрений, NDVI-1 – на полосах с удобрениями.

Для трёх элементов агроландшафтного профиля были рассчитаны коэффициенты корреляции между твёрдостью почвы и NDVI. Для южной, центральной и северной частей трансекты они составили соответственно: $-0,04$ ($p > 0,05$), $-0,25$ ($p < 0,10$) и $-0,37$ ($p < 0,05$).

Выводы

Результаты комплексного сопряженного инструментального исследования твёрдости почвы и вегетационного индекса NDVI трёх различных культур на агрополигоне с всхолмленным рельефом позволили выявить взаимосвязь изучаемых свойств почвы и отклика растительности. Местоположение в рельефе, в частности, экспозиция и крутизна склона, оказывает статистически значимое влияние на вегетационный индекс NDVI. В то же время, закономерности пространственного распределения твёрдости почвы и NDVI могут существенно отличаться друг от друга.

Благодарность

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных исследований по тематике государственного задания, проект FGGU-2022-0012.

Литература

- Почвенно-геологические условия Нечерноземья (1984) Коллективная монография под. ред. Белоусовой О.А. и др. Москва, 1984. 608 с.
- Иванов Д.А., Карасева О.В., Рублюк М.В. (2019) Результаты длительного мониторинга продуктивности многолетних трав в пределах агроландшафта. *Вестник Российской с.-х. науки*. **5**, 8–11. DOI: 10.30850/vrsn/2019/5/8-11

- Шеин Е.В., Иванов Д.А., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В. (2022) Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область). *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. **110**, 5-21. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-5-21
- Иванов Д.А., Железова С.В., Сувернева Е.С., Легашева Е.В. (2023) Влияние агрофона и ландшафта на содержание хлорофилла в листьях озимой ржи. *В сборнике: Проблемы и перспективы инновационного развития землепользования на мелиорированных землях. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. С. 120-125. Издательство: Тверской государственный университет (Тверь)

УДК 631.4.432.2–3

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ОГЛЕЕННЫХ АГРОСЕРЫХ ПОЧВ И ОРТШТЕЙНОВ МЕТОДОМ ТОМОГРАФИИ

Звычайная Е. А.¹, Ковалев И. В.²

^{1,2}Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
ezvychaynaya@gmail.com

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
kovalevmsu@mail.ru

QUANTITATIVE CHARACTERISTICS OF ORTSTEIN PORE SPACE STRUCTURE
IN AGROGRAY SOILS USING TOMOGRAPHY

Zvychaynaya E., Kovalev I.

Lomonosov Moscow State University

Annotation: Agrogray soils in Moscow and Bryansk region under waterlogging conditions form Fe-Mn nodules. X-ray tomography makes it possible to diagnose quickly and efficiently the hydrological state of soils without destruction of samples. Curvature, surface area of inner space, porosity of ortstein were counted as attributes of overmoistened and drained soils.

Введение

Проблема, научная новизна, практическая значимость

Серые лесные почвы являются одними из самых распространенных почв в Московской области. Агросерые почвы различной степени оглеения активно используются в сельском хозяйстве. В настоящее время существует проблема сокращения угодий сельскохозяйственного пользования. В связи с этим необходима диагностика состояния земель и возможности их использования. Около 2/3 почв Московской области подвергнуты заболачиванию, что делает проблему их диагностики для сельскохозяйственного использования еще более актуальной.

Признаками заболачивания являются наличие ортштейнов, сизых пятен оглеения, глинисто-гумусовых кутан, отмытых минеральных зерен в виде белесых прожилок, рыжевато-охристых пятен ожелезнения, более тяжелый гранулометрический состав по сравнению с почвами с промывным водным режимом. Заболачивание происходит в период весеннего снеготаяния и в период обильных осадков благодаря наличию водоупорного слоя в иллювиальном горизонте. Ортштейны являются наиболее долгоживущими новообразованиями среди перечисленных выше признаков, поэтому являются хорошими индикаторами состояния гидрологического режима. Конкреции такого типа, предположительно, реагируют на колебания степени увлажнения (влажности) в различные периоды года, что отражается на структуре порового пространства.

Внутреннее пространство и структура пористых природных тел изучены различными методами, среди которых разрушающие – метод БЭТ, керосиновый метод, сканирующая электронная микроскопия, световая микроскопия. Однако, с помощью томографии высокого разрешения не предпринимались исследования структуры порового пространства ортштейнов, но и почв, в частности.

Попытка описать структуру почв томографическим методом была предпринята ранее. Вопросы структуры почв описали Скворцова, Герке, Корост, Абросимов (2013), Иванов, Шеин, Скворцова (2019); Калнин, Ивонин, Абросимов, Грачев, Сорокина (2021), Шеин, Верховцева, Суздалева, Абросимов (2021) и др. Для ортштейнов такие исследования не проводились.

Цель работы

Изучить геометрию порового пространства в ортштейнах неосушенных и осушенных агросерых оглеенных почв зоны южной тайги с применением методов интегральной геометрии в зависимости от различных факторов, ранее исследованных на объекте.

- Влияние степени гидроморфизма: от глубокооглеенной до глееватой;
- Влияние применения дренажа;
- Динамика структур порового пространства ортштейнов под действием дренажа за 30-летний период.

Задачи

Выяснить зависимость между структурой порового пространства ортштейнов и стадиями их формирования. Провести описание структур в образцах ортштейнов с усилением гидроморфизма агросерых почв от микроповышения к микропонижению. Определить удельную поверхность ортштейнов в растертом и нерастертом состоянии при помощи метода десорбции над солями. Получить при помощи анализа томографических изображений ортштейнов математическое описание и характеристики имеющихся структур, такие как пористость, удельная поверхность. Произвести сравнительную оценку удельной поверхности, полученную методом томографии и методом БЭТ.

Объекты и методы

Объекты исследования

Объект исследования – ортштейны агросерых оглеенных неосушенных и осушенных почв экспериментально-мелиоративного полигона «Кочкарево» Коломенского ополья. Данная местность без осушения характеризуется застойно-промывным водным режимом. Причина заболачивания – застой поверхностных намывных склоновых вод при наименьшем количестве осадков (август) (Зайдельман, Ковалев, 1994). При застое влаги из подвижных соединений железа,

марганца образуются неподвижные формы этих элементов. Из них формируются железомарганцевые стяжения (конкреции), или ортштейны. Процесс конкрециеобразования обусловлен жизнедеятельностью биоты, а также поведением соединений железа при смене окислительно-восстановительного режима, водного режима и режима аэрации.

Объект расположен на юге Московской области, в Ступинском районе, в 2 км западнее железнодорожной станции Сотниково (55.059509, 38.180720).

Почва объекта сформирована на крупнопылевато-иловатом тяжелом покровном суглинке с низкими и средними величинами коэффициента водопроницаемости. Слой суглинка формирует верховодку в ранневесенний и осенний периоды. Верховодка в неосушенном состоянии ведет к вымоканию зерновых культур либо к значительному снижению урожая. Дренаж отводит воду в период снеготаяния и в период обильных осенних осадков. В течение лета явления верховодки не наблюдается.

Почвы объекта:

по классификации 2004 г: агросерые глубокооуглеенные и глееватые:
P-EL-BEL-BT1-BT2-BT3-BCg'-Cg";

по классификации 1977 г: светло-серые глееватые:
Ap,fs,g' - EB p,fs,g' - B1 g'' - B2 g'' - B3g'' - BCg'';

по классификации WRB: Greyic Phaeozems Albic

Методы исследования

Отбор проб почвы производили в зависимости от глубины и горизонта. Здесь приведены результаты по ортштейнам из пахотного горизонта агросерой глубокооуглеенной почвы. Место отбора проб соответствовало координатам контрольных точек отбора предыдущих лет (Kovalev, Sarycheva, 2007). Образцы почвы отбирали лопатой в полиэтиленовые пакеты с соответствующими этикетками, высушивали до воздушно-сухого состояния и взвешивали.

Ортштейны из почвенного образца отмывали методом декантации. После отмывки ортштейны просушивали на воздухе, отбирали корни и камни, взвешивали. Для количественной характеристики содержания ортштейнов в почве использовали массу ортштейнов на 100 г почвы:

$$w_{орт} = \frac{m_{орт}}{m_{п}} \times 100,$$

где $w_{орт}$ – масса ортштейнов на 100 г почвы, г/100 г почвы; $m_{орт}$ – масса ортштейнов, отмывая из образца почвы, г; $m_{п}$ – масса образца почвы, г.

Далее производили фракционирование массы ортштейнов при помощи почвенных сит с диаметром отверстий 1, 2, 3, 5 мм, все фракции отдельно взвешивали и рассчитывали их удельное содержание по приведенной выше формуле.

Компьютерная томография

Компьютерная микротомография (мКТ) образцов ортштейнов проводилась на промышленной системе GE Phoenix v|tome|xL 240/180. Во время съемки образец пошагово поворачивается на платформе, в то время как нанофокусная рентгеновская трубка и детектор неподвижны.

Программное обеспечение GE Phoenix datos|x reconstruction использовалась для преобразования серии из 2400 двумерных рентгенографических изображений в трехмерную модель. Для этого проводилась предобработка изображений.

В силу неоднородной внутренней структуры ортштейна рентгеновская плотность конкреций изменяется в широком диапазоне. При проведении серии экспериментов яркость и контрастность изображений не являются постоянными, даже на одной установке. Поэтому на первом этапе обработки проводился линейный сдвиг контраста для всех изображений. На втором этапе создавалась маска для удаления удерживающего пенала и окружающего ортштейн воздушного пространства. Затем смещением порога бинаризации выделялся ортштейн, и после чего методами морфологического открытия и закрытия удалялись остаточные шумы.

Чем больше интенсивность пикселя, тем больше его рентгеновская плотность. Для того, чтобы перевести серию двумерных рентгенографических изображений в трехмерную модель, необходимо разделить объект на две фазы: представляющую исследовательский интерес и фоновый материал.

Вычисление характеристик порового пространства ортштейнов

В ортштейнах в качестве объектов исследования могут быть выбраны как поровые пространства, так и различные твердые компоненты. В нашей работе измеряются характеристики порового пространства ортштейнов: кривизна, пористость ортштейна, объём ортштейна, площадь поверхности. Они вычисляются путем подсчета пикселей на бинаризованных изображениях, объединенных в трехмерные модели.

Функционалы Минковского в трехмерном пространстве повторяют морфологические характеристики. Например, площадь поверхности, интегральная средняя кривизна поверхности (Arns, Knackstedt, 2004).

Средняя кривизна внутривпоровой поверхности твердой фазы означает интегральную сумму величин, обратных радиусу кривизны поверхности, и усредненную по трем измерениям – x , y , z .

$$\int_S \frac{1}{R} dS = \int_S (R)^{-1} dS.$$

Пористость ортштейнов считалась из отношения количества пикселей пор N_{px} пор (пустого пространства, не содержащего каких-либо веществ) к количеству пикселей материала N_{px} материала, взятого вместе с количеством пикселей пор N_{px} пор (в знаменателе оно незначительно и рассматривалось как погрешность):

$$\varepsilon = \frac{N_{px} \text{ пор}}{N_{px} \text{ пор} + N_{px} \text{ материала}} \times 100\%$$

Объём ортштейна, мм³, рассчитывается программой из N_{px} материала, то есть по количеству «непустых» пикселей, содержащих материал.

Площадь поверхности ортштейна рассчитывалась как количество «пустых» и «непустых» пикселей.

Отметим, что для расчетов показателей проводилось усреднение.

Метод БЭТ

Была поставлена дополнительная задача - сравнить поверхность ортштейнов различных фракций в растертом и нерастертом состоянии, определенных различными методами. Для определения пользовались методом десорбции насыщенного водяного пара над солями. Было взято 10 образцов ортштейнов из глееватой почвы.

Образцы помещались в бюксы с известной массой, затем производилось насыщение до постоянной массы над насыщенными водяными парами в течение трех-четырех недель, затем десорбция последовательно над солями с разными значениями рF (рис. 2).

Результаты и обсуждение

Морфология ортштейнов

Общее содержание и формы железисто-марганцевых конкреций в гумусовых горизонтах данных почв отражают степень гидроморфизма этих почв: их количество минимально в «автоморфной» (глубокооглеенной) почве (Ковалев и др., 2022).

Более крупные ортштейны имеют неправильную форму, оваловидную или близкую к бобовидной, как следствие – большую по модулю кривизну поверхности (рис. 1, а, б). Также в более крупных ортштейнах овальной формы наблюдается не один центральный, а несколько периферических менее выраженных центров концентрирования (рис. 1, б).

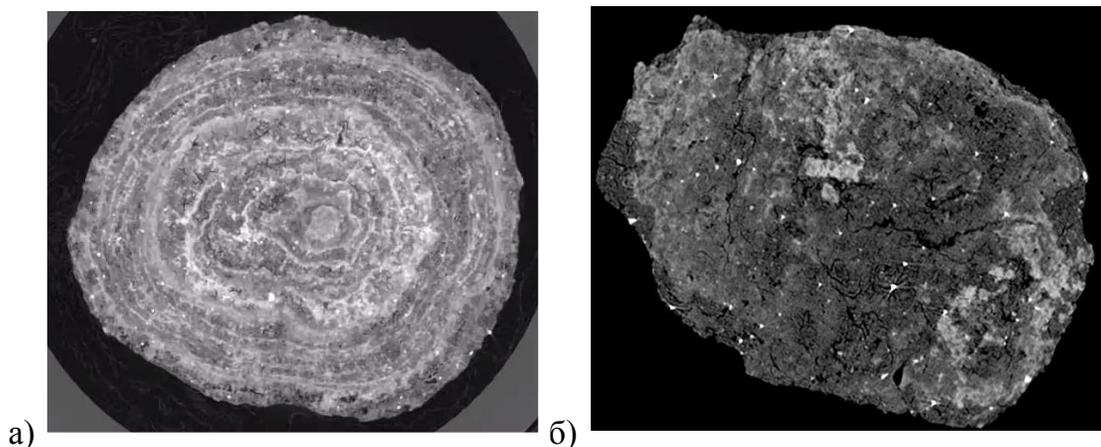


Рис. 1. Внутреннее строение ортштейнов: а – концентрическая форма на примере ортштейна фракции 2–3 мм, б – бобовидная форма на примере ортштейна фракции 3–5 мм.

Данные томографии

Обратимся к данным, полученным в результате томографического исследования образцов фракций от 1 до 5 мм.

Пористость ортштейнов, определенная таким методом, неодинакова: в более крупных ортштейнах процент пор меньше, чем в мелких разностях (1,65–2,42% и 3,90–4,21% соответственно).

Объем конкреций также неодинаков: с увеличением размера ортштейнов наблюдается четкое увеличение объема конкреций (от 4,08 мм³ в мелких фракциях до 17,25 мм³ в крупных). Это закономерно благодаря связи размеров и объема ортштейнов: чем крупнее фракция ортштейна – тем больше его объем.

С ослаблением степени гидроморфизма от глееватой до глубокооглеенной, в ортштейнах увеличивается по модулю кривизна поверхности (от 563,63 мм до 1507,23 мм). Наименьшие показатели округлости или кривизны поверхности наблюдаются в крупных ортштейнах вытянутой формы, фракция 3–5 мм.

Показано также, что более крупным ортштейнам характерно нарастание площади поверхности ортштейнов. Таким образом, все проанализированные показатели выявили зависимость от фракции в ортштейнах в глееватой почве, где выраженность процессов ортштейнообразования наибольшая.

Площадь поверхности методом БЭТ

Обратимся к таблице результатов измерений площади поверхности образцов ортштейнов в растертом и нерастертом состоянии (рис. 2). Так, для ортштейнов глубокооглеенной и глееватой почвы значительных различий в площади поверхности между растертыми и нерастертыми образцами не наблюдается (133,7

мм² в нерастертом, и 140,8 мм² в растертом образце). Площадь поверхности методом БЭТ увеличивается от ортштейнов глубокооуглеенной до глееватой почвы (от 91,1 мм² до 132,5 мм² соответственно).

Была предпринята попытка (рис. 2) сравнить изменения площади поверхности методом БЭТ в растертых и нерастертых образцах.

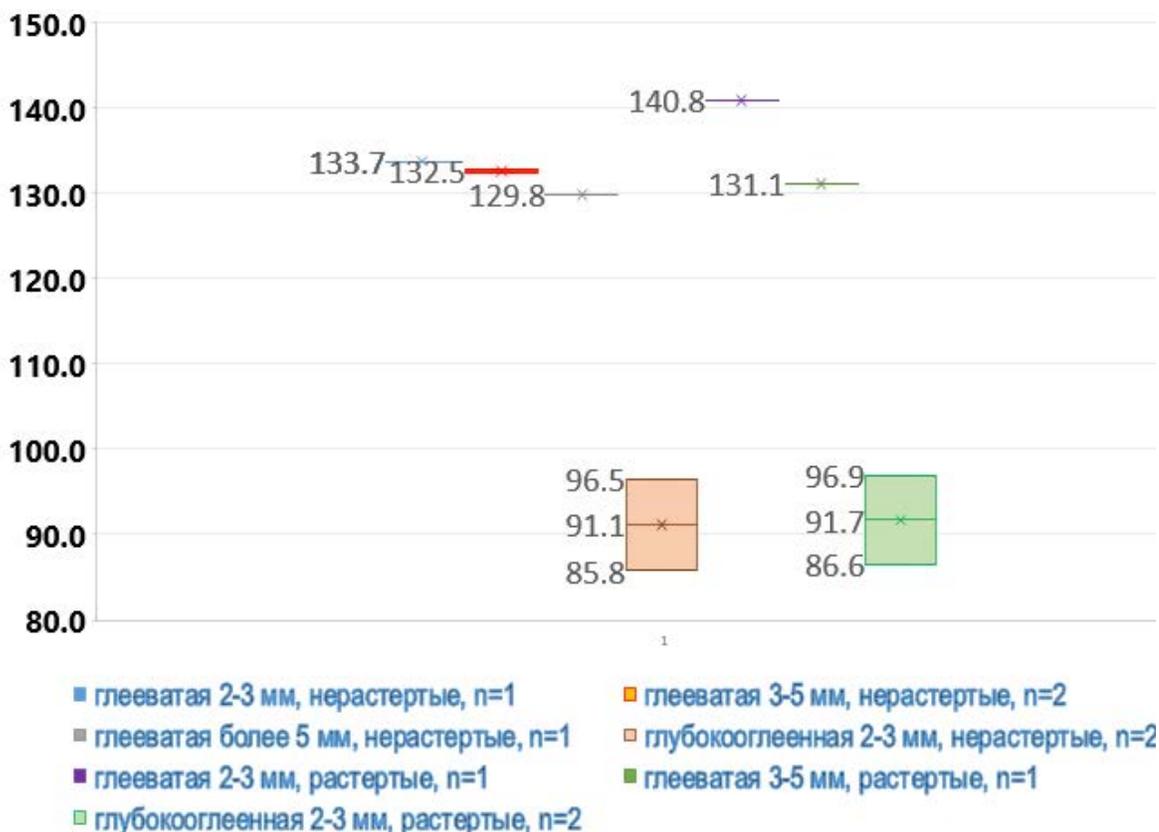


Рис. 2. Площадь поверхности ортштейнов, определенная методом БЭТ (мм²), для нерастертых и растертых образцов, фракции 2–3 мм и 3–5 мм.

Таким образом, метод томографии в целом подтверждает свою достоверность по показателю «площадь поверхности» в сравнении с методом БЭТ.

Влияние дренажа и времени на состояние показателей в ортштейнах

По средней кривизне поверхности и пористости ортштейнов осушенные почвы со временем приближаются к «автоморфным» (глубокооуглееным) почвам. Также в течение 30 лет были отмечены изменения в ортштейнах, которые связаны с уменьшением их объема и средней кривизны. Также были обнаружены изменения в площади поверхности и пористости.

Выводы

1. Подтверждено: содержание ортштейнов в почвах с естественным водным режимом адекватно отражает степень гидроморфизма серых почв.
2. Морфологические свойства ортштейнов определяются процессом ортштейнообразования, а именно размером ортштейнов. Метод компьютерной микротомографии позволяет обнаружить отчетливый центр концентрирования, хорошо выраженные кольца нарастания колоний микроорганизмов в мелких фракциях (1–3 мм) ортштейнах, их концентрически-тонкослоеватое сложение.
3. Рентгеновская компьютерная микротомография позволяет установить различия по кривизне поверхности, объему, пористости и удельной поверхности в зависимости от размера конкреций даже при детальном рассмотрении: фракции 1–2; 2–3 и 3–5 мм. С увеличением размера конкреций порозность, кривизна поверхности, объем, удельная поверхность – возрастают.
4. Сравнительная оценка удельной поверхности, полученной методом томографии и методом БЭТ, имеют близкие значения (с учетом математического расчета). При этом удельная поверхность по методу БЭТ для растертых и не растертых ортштейнов значимо не отличается.
5. Осушение приводит к глубокой трансформации и таких устойчивых соединений как конкреции: произошло уменьшение объема и кривизны ортштейнов; а площадь поверхности и пористость характеризуются широким варьированием. Это утверждение оказалось справедливым и за 30-летний период после действия дренажа.
6. По средней кривизне поверхности и пористости ортштейнов осушенные почвы со временем приближаются к «автоморфным» (глубокооглееным) почвам.

Благодарности

Заместителю директора Центра науки и технологий добычи углеводородов Сколтеха Гришину П.А. и старшему научному сотруднику Бурухину А.А. за компьютерную микротомографию ортштейнов, научной группе кафедры математического моделирования и информатики физического факультета МГУ за помощь в обработке результатов томографии.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда №23–24–00155.

Литература

Зайдельман Ф. Р., Ковалев И. В. (1994) Эколого-гидрологическая оценка светло-серых оглеенных почв, осушенных бестраншейным и траншейным дренажом. *Почвоведение* **1**, 116–127.

- Иванов А.Л., Шеин Е.В., Скворцова Е.Б. (2019) Томография порового пространства почв: от морфологической характеристики к структурно-функциональным оценкам *Почвоведение* **1**, 61-69.
- Калнин Т.Г., Ивонин Д., Абросимов К.Н., Грачев Е.А., Сорокина Н.В. (2021) Анализ томографических изображений структуры порового пространства почв методами интегральной геометрии. *Почвоведение* **9**, 1113–1123.
- Ковалев И. В., Ковалева Н. О., Столпникова Е. М., Федотов А. Б. (2022) Возраст и генезис Fe-Mn - конкреций серых лесных почв южной тайги, по результатам изотопных и метагеномных исследований. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение* **4**, 97–105.
- Скворцова Е. Б., Герке К. М., Корост Д. В., Абросимов К. Н. (2013) Строение порового пространства в подзолистых горизонтах суглинистых почв (анализ 2d и 3d изображений). *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева* **71**, 65-79.
- Шеин Е.В., Верховцева Н.В., Суздалева А.В., Абросимов К.Н. (2021) Рентгеновская компьютерная томография структуры корней и динамика почвенной биоты на ранних стадиях роста ячменя (*Hordeum vulgare* L.). *Вестник Томского государственного университета. Биология* **53**, 6–21.
- Arns C.H., Knackstedt M.A., Mecke K.R. (2004) Characterisation of irregular spatial structures by parallel sets and integral geometric measures. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* **241**, 351-372. <https://theorie1.physik.uni-erlangen.de/mecke/papers/arns04.pdf>
- Kovalev I.V., Sarycheva I.V. (2007) Iron in Hydromorphic Gray Forest Soils. *Moscow University Soil Science Bulletin*. **62** (2) 83–89.

УДК 631.4

УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЧВЕННЫХ АГРЕГАТОВ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ В УСЛОВИЯХ ВОДОРОДНОЙ ДЕГАЗАЦИИ ЗЕМЛИ

Зубкова Т.А., Суханова Н.И.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
dusy.taz@mail.ru

STABILITY OF SOIL AGGREGATES TO MECHANICAL IMPACTS UNDER CONDITIONS OF HYDROGEN DEGASED EARTH

Zubkova T.A., Sukhanova N.I.
Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science

Annotation: The stability of soil aggregates under conditions of increased endogenous hydrogen flows was found to decrease by 2-3 times compared to the control plot. These phenomena were more noticeable in the subarable horizons (20-80 cm) and in the stability of the larger aggregate fraction of 3-5 mm compared to the fraction of 2-3 mm.

Введение

В настоящее время нарастают явления водородной дегазации недр планеты практически на всех континентах [Ларин, 2005; Сывороткин, 2002]. Среди эндогенных газов, выделяющихся в атмосферу, основную долю составляет водород (более 88,6%), 11,3% - гелий и 0,1% - другие. Дегазация осуществляется в разломно-блоковых структурах земной коры, которые служат проводниками флюидов и глубинных газов. В зоне этих дислокаций происходят климатические и геофизические изменения на границе литосфера-атмосфера атмосферного давления [Кутинов и др., 2018]. Установлено влияние H_2 на структурные и оптические свойства растений [Тимченко и др. 2014]. В карбонатных осадочных породах, перекрывающих разломы, водородный флюид создает пористость и образует на поверхности кольцевые структуры проседания (западины), хорошо дешифрируемые на космических снимках (рис.1).

Плотность водородных западин может составлять от 15 до 50% и более. По данным водородометрии поток водородного флюида максимален в западинах, однако непостоянен в пространстве и во времени по элементам западин [Ларин, 2005, Сывороткин, 2002, Суханова и др., 2020, 2022]. В России скопления водородных западин отмечаются в Липецкой, Воронежской, Волгоградской областях, в Западной Сибири и др. Если выходы водорода происходят в лесной зоне, то они могут вызывать лесные пожары и приводить к образованию озоновых дыр [Сывороткин, 2002]. Оценка влияния водородного флюида на пахотные почвы представляется актуальной, поскольку изменения химических свойств почвы могут приводить к снижению урожая на 30–40%, а существенная площадь таких

территорий приходится на пахотные почвы сельскохозяйственного назначения. Ранее было показано, что в почвах блюдцеобразных западин формируется восстановительный режим, увеличивается кислотность, содержание подвижного железа, происходит осветление гумусового горизонта из-за изменения состава гумуса в направлении его фульватности [Суханова 2020, 2022]. Данные об изменении физических свойств почвы в условиях водородной эндогенной дегазации практически отсутствуют. Однако их изучение необходимо для расчета экологических рисков природного происхождения.



Рис. 1. Кольцевые структуры западин на пашне в Липецкой области, 2013 год [по Ларину,

Представленная работа посвящена оценке устойчивости почвенных агрегатов в условиях повышенной водородной дегазации. Предполагается, что в таких условиях агрегаты становятся неустойчивыми и подвержены разрушению в результате изменений в составе гумуса. В задачи исследования входило определение морфологических свойств почв, устойчивости агрегатов размером 2-3 мм и 3-5 мм к механическим воздействиям, содержания гумуса и pH почвы.

Объекты и методы исследования

В работе использованы три методологических подхода исследования почв в условиях водородной дегазации Земли. Связано это с особенностями образующегося рельефа – водородными западинами. В почвах западин концентрация молекулярного водорода превосходит в несколько раз его концентрацию на межзападинных участках [Суханова и др., 2022; Ларин, 2012]. Поэтому на первом этапе сравнивали физические свойства агрегатов в почвах западин и межзападинных участков (контроль, где водородные потоки на уровне фоновых). Второй этап анализа данных заключался в сравнительном анализе физических свойств агрегатов

по трансекте, заложенной от центра западины, через склон, и периферийную часть до контрольного участка. Связано это с неоднородной структурой западины (центр, склон, периферия), и соответственно почв на разных ее элементах. Поэтому важно выявить тенденции изменения свойств агрегатов в трансекте от центра западины к контролю. Третий уровень анализа данных сравнительно-географический, при котором сопоставлялись различные территории западных комплексов, образованных или под влиянием эндогенного водорода (Липецкая и Воронежская области) или в его отсутствии (Ростовская область). Поскольку экспериментальные участки располагаются в разных областях, и соответственно почвообразование происходит в разных почвенно-климатических условиях, то исследуемые почвы различаются по типу, по гранулометрическому составу и др. свойствам, которые непосредственно влияют на прочность агрегатов. В таком случае, сравнивали тренды изменения свойств агрегатов по западным трансектам в направлении центр–склон–периферия–контроль. Сравнение трендов позволяет не учитывать абсолютные значения устойчивости агрегатов.

Полевые исследования проводили в трех регионах России различных по эмиссии водорода: Липецкая и Воронежская области с повышенным выделением молекулярного водорода и Ростовская область, где не обнаружены аналогичные потоки H_2 .

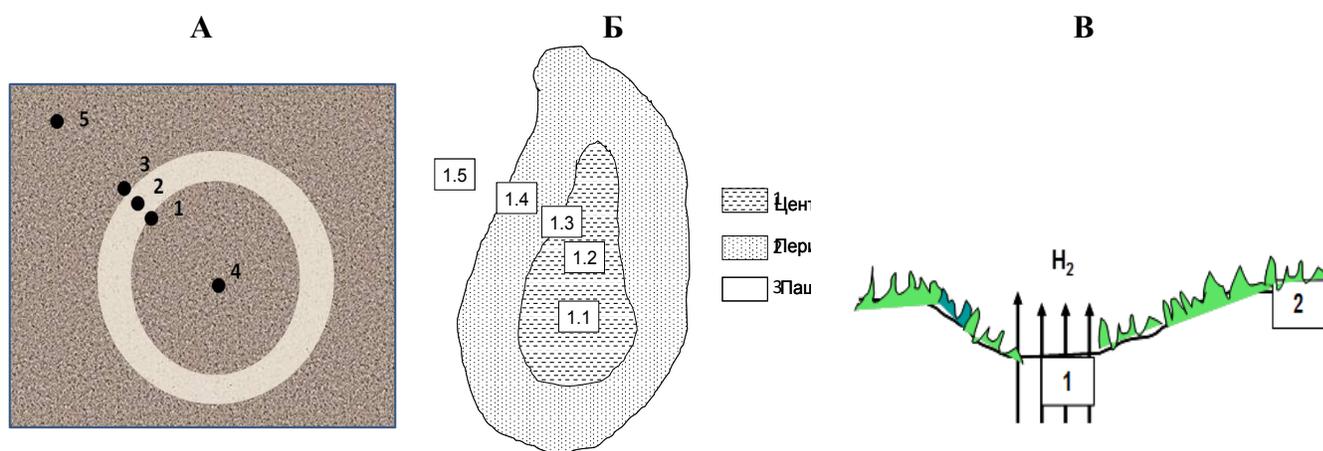


Рис.2. Схема расположения почвенных разрезов на элементах западины: Липецкая область, агросеры почвы (А): 1-3 – склон и периферия западины, 4 – центр, 5 – за пределами западины (контроль), вид сверху; Ростовская область, черноземы обыкновенные (Б): 1.1 – центр западины, 1.2-1.4 – склон и периферийная часть, 1.5 – за пределами западины (контроль), 1 – центр мочара, 2 – склон и край мочара, 3 – пашня (контроль), вид сверху; Воронежская область, черноземы обыкновенные среднесуглинистые (В).

Были заложены три экспериментальные площадки на депрессивных элементах рельефа – одна в Липецкой области, почвы агросеры пахотные легкосуглинистые,

вторая – в Воронежской области, почвы черноземы обыкновенные среднесуглинистые, в условиях повышенных водородных потоков из глубинных недр (в среднем 0,65 % H₂), и третья – в Ростовской области, черноземы обыкновенные тяжелосуглинистые, где концентрация водородных флюидов была на уровне фоновых значений (в среднем 0,005% H₂). На рисунке 2 представлены схемы расположения разрезов в западной трансекте.

Западный комплекс в Воронежской области расположен в ее северо-восточной части – Хоперский глубинный разлом, левобережье р. Хопер в окрестностях г. Поворино, Борисоглебск, Новохоперск. Почвы – черноземы обыкновенные среднесуглинистые, интенсивно используются в сельском хозяйстве [Суханова и др., 2020]. Западина малых размеров, в диаметре около 30 м, поэтому заложены только два разреза: на дне западины и за ее пределами (контроль). Почвы имеют следующий профиль:

Разрез 1, дно западины (Апах, 0-24см, Ап/п, 25-27 см; Ап/п, 28-36; Ап/п, 37-46; АВ, 47-60 см; В2, 61-86; В2, 87-97; С, 98-110 см)

Разрез 2, вне западины, контроль (Апах, 0-22 см; Апах, 23-25; Ап/п, 26-55 см; АВ, 50-70 см; В1, 71-90, В2са, 91-116 см; С, 117-120 см);

Западина в Липецкой области (с. Сселки) расположена на 4-5-летней залеже. Почва агросерая, легкосуглинистая, развита на песках. Диаметр западины 250 м, глубина 1 м. Заложено 5 почвенных разрезов по трансекте через центр западины, склон, периферийную часть к контролю, расположенному в 20 м от края западины (Рис. 2,А). Почвы исследуемых разрезов имеют следующий профиль:

Разрез 1 (Апах, 0-24см, Ап/п, 25-44 см; А 45-61 см; АЕ 62-105см; В1 106-150 см; В2 151-200 см).

Разрез 2 (Апах 0-23 см; Ап/п 24-41 см; А 42-68 см; Е 69-135 см; В 136-170 см).

Разрез 3 (Апах 0-22 см; Ап/п 23-32 см; АЕ 33-84 см; В 85-117 см).

Разрез 4 (Апах 0-22 см; Ап/п 23-44 см; Е 45-75 см; В 76-104 см).

Разрез 5 (Апах 0-22 см; Ап/п 23-42 см; АВ1 43-65 см; В1 66-104 см; ВС 105-150 см).

Параллельно с исследованием почвенных разрезов проводилась полевая водородометрия [Суханова и др., 2011].

Западина в Ростовской области (рис.2, Б) была выбрана в качестве дополнительного контроля для почв депрессионных элементов рельефа, в которых нет повышенных водородных потоков, но имеют место явления, характерные для переувлажненных почв западин. Водородометрия показала на глубине 120 см концентрации водорода 0-5 ppm, такие же, как в атмосферном воздухе. Западина расположена в Зерноградском районе Ростовской области. Она географически не связана с глубинными разломными зонами, сформирована в соответствии с рельефом местности и питается атмосферными и стоковыми водами. Это мочар

неправильной формы с типичными свойствами, определяемыми временным переувлажнением в степной зоне. Фоновая почва – чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый североазовский. Нумерация почвенных разрезов возрастает в порядке удаления от центра западины (Рис.2,Б). Исследования проводились в верхних гумусовых горизонтах: Ап_а, 0-22 (26) см и Ап_п, 26-40(45) см.

Устойчивость агрегатов оценивали по силе разрушения воздушно-сухих агрегатов (F) двух агрономически ценных фракций со средним диаметром 2-3 мм и 3-5 мм. Эта характеристика отражает в себе как физические свойства почвы (гранулометрический состав, площадь удельной поверхности, порозность), так и химические свойства поверхности [Зубкова и др., 2001]. Определения проводили методом прямого механического раздавливания на приборе по типу пресса, модифицированная модель МП-2С (Россия) в 35-кратной повторности в единицах силы, кГ [Теории и методы., 2007] с последующим пересчетом в ньютоны по формуле $N = kГ/9,8$. Преимущество этого метода исследования в том, что определение проводится с естественными воздушно-сухими агрегатами, без предварительного нарушения его целостности и с высокой повторностью. Общее содержание органического вещества (Сорг) определяли по Тюрину. Поток молекулярного водорода измеряли переносным газоанализатором водорода ВГ-3В (Россия). Статистическую обработку результатов проводили в программе “Statistica-6.1”.

Результаты и обсуждение

Воронежская область. В верхних гумусовых горизонтах черноземов обыкновенных устойчивость агрегатов на дне западины снижается в 2-3 раза фракции размером 2-3 мм и в 2-4 раза для фракции размером 3-5 мм. Таким образом, по агрегатам из черноземов обыкновенных в западинах Воронежской области можно заключить следующее: в центре водородных западин устойчивость агрегатов к механическому воздействию снижена в 1,5-3 раза по сравнению с фоновыми почвами. Проявляется такая закономерность в пахотных и подпахотных горизонтах, причем заметнее выражена для агрегатов фракции 3-5 мм по сравнению с более мелкой фракцией 2-3 мм.

Липецкая область. Почвы на периферийной части западин характеризуются низким содержанием органического вещества: Сорг от 0,98% в пахотном горизонте до 0,13% на глубине 100 см. В центре западины и в фоновой почве гумуса на порядок больше – 1,99-2,36% Сорг (Таблица 1). Осветление почв, обеднение гумусом и его деструкция отмечались и в черноземах обыкновенных Воронежской и Волгоградской областей, где также фиксировались потоки эндогенного водорода [Суханова, 2020]. Агрегаты теряли прочность и рассыпались при незначительной механической нагрузке [Зубкова и др., 2018]. В агросерых почвах Липецкой области в условиях повышенной эксгаляции N₂ агрегаты также неустойчивые, сила их

раздавливания в 2-5 раз меньше значений в фоновой почве (Рис.4). Причем, для крупных агрегатов эта разница заметнее. Обращает внимание низкая устойчивость агрегатов на склоновых и периферийных элементах западины по сравнению с центральной частью, что может быть связано с максимальной освещенностью верхних горизонтов почвы и низким содержанием гумуса (Таблица 1).

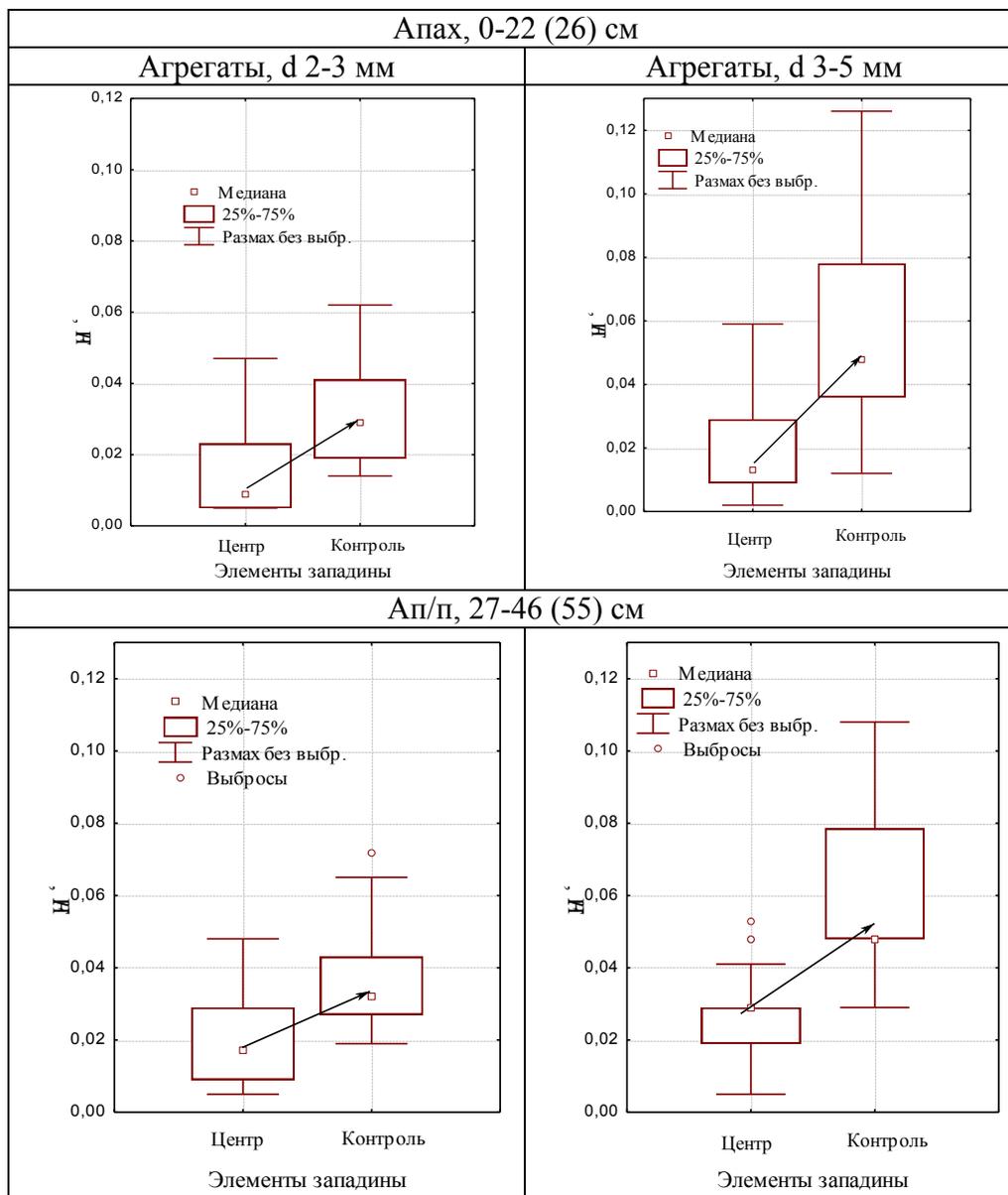


Рис. 3. Статистики устойчивости почвенных агрегатов по элементам западины в Воронежской области.

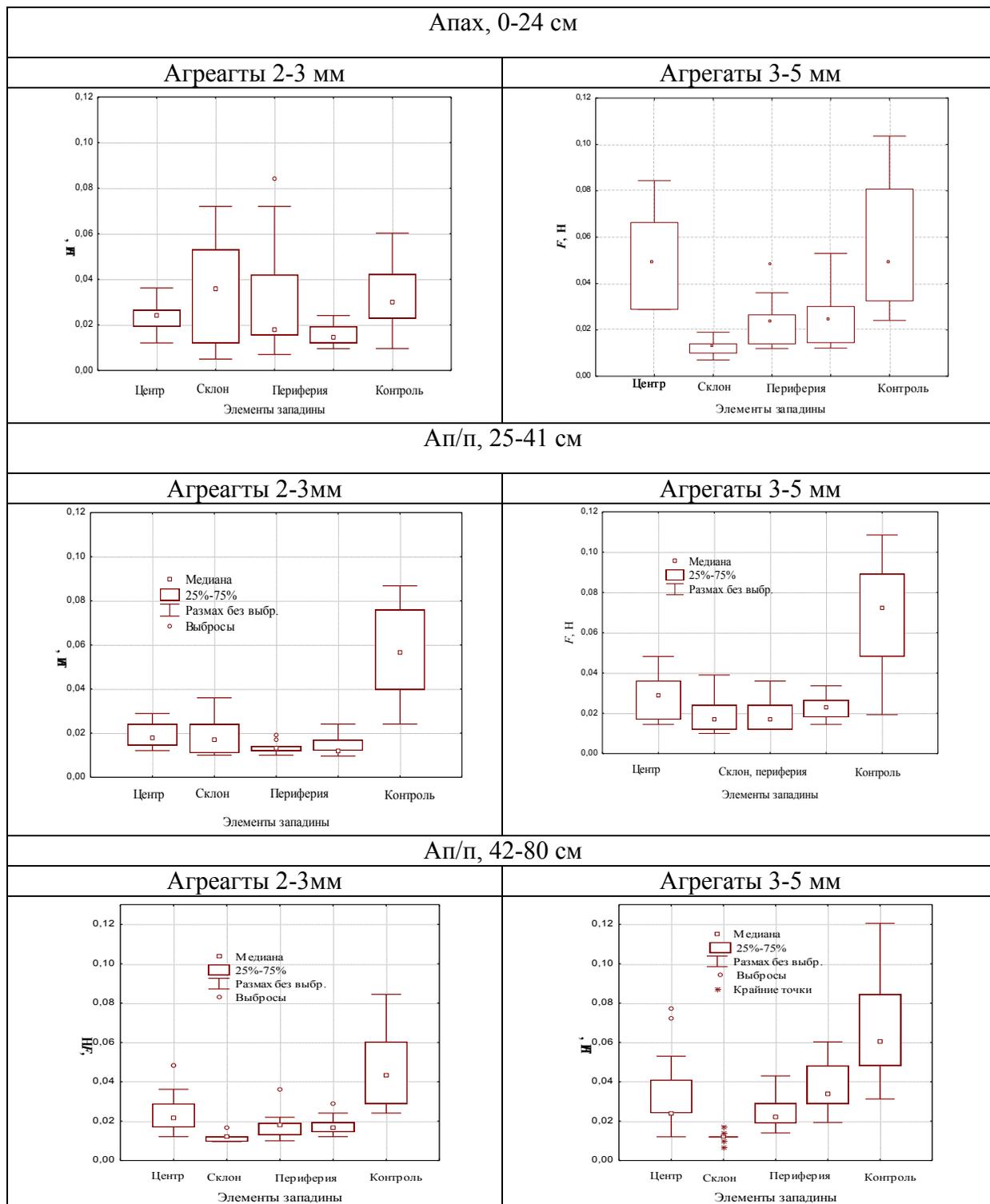


Рис. 4. Статистики устойчивости агрегатов из агросерой почвы по элементам западины в Липецкой области.

Таблица 1. Содержание Сорг и рН в почвах Липецкой и Воронежской областей

№ разреза	Горизонт	Глубина, см	Гумус, Сорг, %	рН
Липецкая область				
1	Апах	0-24	0,72	7,17
	Ап/п	25-44	0,70	6,90
	А	45-61	0,58	7,24
2	А пах	0-23	0.78	7.48
	А п/п	24-41	0.60	7.66
	А	42-68	0.34	7.40
3	А пах	0-22	0.98	7.52
	А п/п	23-32	0.42	7.52
	АЕ	33-84	0.46	7.38
4	А пах	0-22	2.36	6.78
	А п/п	23-44	1.07	6.84
	Е	45-75	0.44	6.47
5	А пах	0-22	1.99	6.24
	А п/п	23-42	1.60	6.45
	АВ1	43-65(79)	0.81	6.86
Воронежская область				
1	Апах	0-24	2,47	5,37
	Ап/п	27-36	1,82	5,45
2	А пах	0-22	2,28	6,17
	Ап/п	26-55	1,88	6,81

На дне западины агрегаты прочнее. Однако в подпахотных горизонтах отмечается более высокая устойчивость агрегатов в фоновой почве по сравнению с западиной. В верхних пахотных горизонтах повышено варьирование данных, а для фракции 2-3 мм различия по элементам западины недостоверны. Обычно, прочность агрегатов возрастает с увеличением его размера [Зубкова и др., 2001]. Но в пахотном горизонте (0-24 см) на склоне западины (рис.4) сила разрушения мелких агрегатов 2-3 мм (0,035 Н) почти в 3 раза превосходит таковую в более крупной агрегатной фракции (0,012 Н), что может быть связано с варьированием данных в Апах.

Ранее было показано, что прочность крупных агрегатов более чувствительна к гумусовым связкам, чем мелких агрегатов [Зубкова и др., 2006]. Аналогичные тенденции наблюдаются и в исследуемых почвах. То есть именно на крупных агрегатах отразилось изменение состояния органического вещества. По данным модельных и полевых экспериментов в почвах, подверженных действию молекулярного водорода, происходит трансформация органического вещества: на фоне увеличения или уменьшения общего содержания происходит осветление гумусового горизонта вследствие возрастания его фульватности [Суханова и др.,

2020]. Возможно с трансформацией органического вещества почвы в направлении возрастания его фульватности связана потеря устойчивости агрегатов.

Таким образом, по водородной западине Липецкой области устойчивость агрегатов агросерой почвы в 1.5-3 раза снижена по сравнению с контролем. Эти явления заметнее проявлялись в более крупной агрегатной фракции с диаметром частиц 3-5 мм по сравнению с фракцией 2-3 мм и в подпахотных горизонтах (25-60 см). В пахотном горизонте (0-24 см) разброс данных выше, причем для агрегатов 2-3 мм различия между западиной и фоновой почвой недостоверны.

Ростовская область. Для исследованных агрегатных фракций размером 2-3 мм и 3-5 мм наблюдается уменьшение их прочности по мере удаления от дна западины (мочара). В центральной его части, где почвы испытывают периодическое переувлажнение, агрегаты – высокопрочные: в среднем $P = 0,18-0,20$ Н для агрегатов 2-3 мм и 0,28 Н для агрегатов 3-5 мм. По мере удаления от центра их прочность снижается в среднем в 3 раза, достигая минимума в разрезе 1.5 (за пределами западины): в среднем 0,05 Н для агрегатов 2-3 мм и 0,1-0,15 Н для фракции 3-5 мм. Причем на глубинах 26-40 см эта зависимость проявляется заметнее. Разброс данных выше в верхних гумусовых горизонтах по сравнению с подпахотными, причем, как для агрегатов 2-3 мм, так и для фракции 3-5 мм (Рис.5).

Таким образом, в условиях периодического переувлажнения и заболачивания, без участия эндогенных H_2 потоков, устойчивость агрегатов максимальная в центре западины, она превышает в 2-3 раза таковую в фоновых почвах. Полученные результаты согласуются с почвенными особенностями аналогичных западин на Тамбовской равнине, для которых характерны повышенная плотность, ухудшение структурного состояния с образованием глыбистых агрегатов, а также понижение межагрегатной пористости и размеров внутриагрегатных пор [Степанцова, 2012].

Для пахотных агросерых почв Липецкой области, где повышены потоки эндогенного водорода по сравнению с фоновыми значениями, наблюдается обратная связь в депрессионных элементах рельефа. В ряду от центра западины к периферии устойчивость агрегатов растет, т.е. в самой западине агрегаты менее устойчивы к механическому разрушению. Аналогичные явления наблюдаются и в западинных комплексах Воронежской области (Рис.3). Вероятно, в присутствии H_2 происходит ослабление внутриводородных связей и как следствие потеря устойчивости и прочности агрегатов.

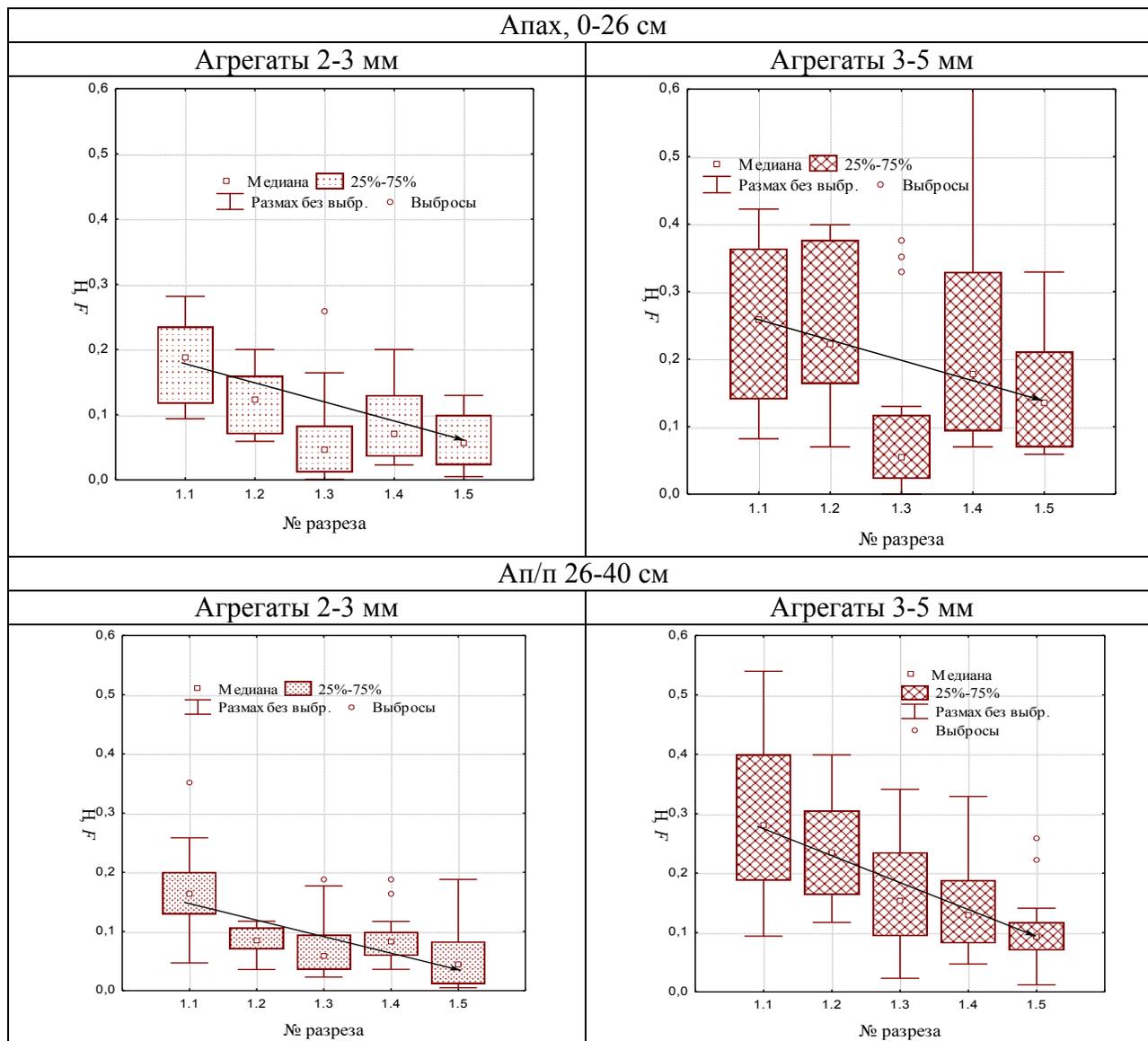


Рис.5. Статистики устойчивости агрегатов размером 2-3 мм и 3-5 мм по западной трансекте в Ростовской области в пахотном (0-26 см) и подпахотном горизонтах (26-40 см) на разных элементах западины в направлении от центра (разрез 1.1), периферия (разрезы 1.2-1.4) до фоновой (разрез 1.5).

Следует отметить, что устойчивость агрегатов из черноземов обыкновенных Ростовской области на порядок превосходит агрегатов из агросерой почвы Липецкой области по абсолютным значениям, что связано с различием почв по гранулометрическому составу. Тяжелый суглинок чернозема обыкновенного создает условия для более тесного межчастичного контактирования по сравнению с

почвами легкого и среднего гранулометрического состава [Зубкова и др., 2001], что и отражается в упрочнении агрегатов и повышении их устойчивости к механическим воздействиям.

Формирование агрегатов происходит при непосредственном участии органического вещества почвы, поэтому свойства агрегатов находятся в тесной связи с общим количеством и качеством почвенного гумуса. Однако, если в обычных природных условиях без участия водородных эндогенных потоков, наблюдалась прямая зависимость устойчивости агрегатов с общим содержанием органического углерода верхних гумусовых горизонтов (Рис.6,А), то в условиях водородной дегазации связь обратная (Рис.6, Б).

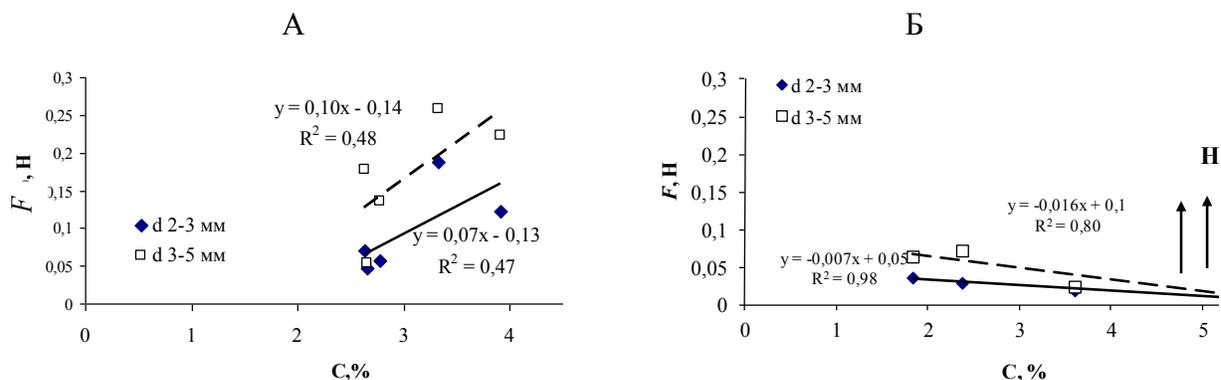


Рис.6. Зависимость устойчивости агрегатов от содержания гумуса в почвах западин Ростовской области (А) и Воронежской (Б).

Выводы

Установлено снижение устойчивости почвенных агрегатов к механическому воздействию в 1,5-3 раза по сравнению с фоновыми черноземами обыкновенными среднесуглинистыми, в западных комплексах Воронежской области, и агросерыми легкосуглинистыми почвами Липецкой области, в условиях повышенных потоков эндогенного водорода (0,65% H₂). Эти явления заметнее проявлялись в более крупной агрегатной фракции с диаметром частиц 3-5 мм, чем во фракции 2-3 мм. В верхних пахотных горизонтах (0-24 см) разброс данных выше, чем в подпахотных горизонтах (25-60 см). В западинах Ростовской области, черноземы обыкновенные тяжелосуглинистые, где водородные потоки на уровне фоновых (0,005 % H₂), тренд устойчивости агрегатов снижался в направлении от центра западины к контролю.

Статья подготовлена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800146-3

«Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления»).

Литература

- Зубкова Т.А., Суханова Н.И. (2018) Особенности почвенных агрегатов в условиях выделения эндогенного водорода. *Пространство и время*. **1-2 (31-32)**, 181-192.
- Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Матричная организация почв. М.: РУСАКИ, 2001. 296 с.
- Зубкова Т.А., Котлярова В.В., Белоусов В.М., Мартынова Н.А. (2006) Особенности агрегатного состава дерново-карбонатных почв на лессах и лессовидных суглинках Восточного Забайкалья. Почва как связующее звено функционирования природных и антропогенно-преобразованных экосистем. Материалы II межд. научно-практ. конф, Иркутск, ИГУ.
- Кутинов Ю., Чистова З., Беляев В., Неверов Н. (2018) Земля как система оболочек, объединённых каналами глубинной дегазации. <https://regnum.ru/news/innovatio/2428428.html>
- Ларин В.Н. (2005) Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М.: «Агар», 248 с
- Н.В. Ларин Доклад 2012 года на конференции «Система. Планета. Земля».
- Степанцова Л.В. (2012) Агрофизические свойства, гидрологический режим и диагностика черноземовидных почв севера Тамбовской низменности. Диссертация на соискание ученой степени д.б.н. М. 319 с
- Суханова Н.И., Трофимов С.Я., Полянская Л.М., Ларин Н.В., Ларин В.Н. (2013) Изменение гумусного состояния и структуры микробной биомассы в местах водородной эксгалляции. *Почвоведение. Eurasian Soil Science*. **2**, 152–162
- Суханова Н.И., Трофимов С.Я., Степанов А.Л., Кирюшин А.В. (2020) Особенности черноземных почв района Хоперского глубинного разлома земной коры *Почвоведение*. **2**, 1-11.
- Суханова Н.И., Кирюшин А.В. (2022) Особенности гумусного состояния черноземных почв, формирующихся в условиях выхода глубинного водорода в различных условиях увлажнения. *Почвы и окружающая среда*. **5(3)**. e184. DOI: 10.31251/pos.v5i3.184
- Сывороткин В.Л. (2000) Озоновые аномалии над Воронежем – индикаторы глубинной дегазации. Материалы к литолог. Совещ. «Литология и полезные ископаемые Центральной России, 3-8 июля 2000, с.81-82.
- Сывороткин В. Л. (2002) Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: ООО «Геоинформцентр». 2002. 250 с.

- Теории и методы физики почв. Коллективная монография под общей редакцией Шеина Е.В. и Карпачевского Л.О. М.: «Гриф и К». 2007 г. 616 с.
- Тимченко Е.В., Тимченко П.В., Селезнева Е.А. (2014) Экспериментальные исследования влияния водорода на оптические характеристики растений. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. **Т.16**. Вып. № 1-1
- Larin N., Zgonnik V., Rodina S., Deville E., Prinzhofer A. and Larin V. Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Surficial, Rounded Depressions on the European Craton in Russia. *Natural Resources Research*, 2014, p.1-15.
- Sukhanova N.I., Lysak L.V., Kiryushin A.V. (2019) Influence of Hydrogen Fluid on Plants in Natural Conditions and a Model Experiment. *Moscow University Soil Science Bulletin*, **74(5)**, 208-213
- Sukhanova N.I., Zubkova T.A. (2018) State of organic matter and particularities of physicochemical properties of soils in the endogenous hydrogen seepage zones. *Open Journal of Soil Science*, **8**, 186-196

ENERGY EFFICIENCY MONITORING SYSTEM OF OPERATED IRRIGATION PUMPING STATIONS IN UZBEKISTAN

Nazir Ikramov^{1*}, Farkhod Kasimov², Mekhrbonu Rakhimova³

¹ Pumping stations and hydropower plants Department, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers National Research University, Tashkent, P.O. Box 100000, Uzbekistan. E-mail: ikramov-1978@mail.ru

² Automation of production processes Department, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, P.O. Box 100095, Uzbekistan. E-mail: fqosimov@gmail.com

³ Applied mathematics and intellectual technology Department, National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, P.O. Box 100095, Uzbekistan. E-mail: mehribonu@gmail.com

*Corresponding author: ikramov-1978@mail.ru

Annotation: This article discusses the problems of online monitoring of water metering in irrigation systems in Central Asia, in particular the Republic of Uzbekistan. The development of an intelligent device and the implementation of the monitoring system is aimed at solving these problems. In Uzbekistan, 2.3 million hectares of irrigated land (53% of the total) are supplied with water by 1,693 pumping stations, annually pumping more than 50 mlr.m³ of water. The annual electricity consumption of these pumping stations is 8-8.2 billion kWh, which is about 11% of the annual electricity generation of the entire energy sector of Uzbekistan. At operated irrigation pumping stations, energy consumption is taken into account manually, most of them do not have accurate water metering devices that could take into account the amount of sediment coming with water. As a result, there was no possibility of monitoring the energy efficiency of the pumping station in real time. In addition, irrigation pumping stations consume 1-3% of electricity from the total annual consumption for their own needs. All this leads to an increase in annual electricity consumption by pumping stations. The purpose of this study is the scientific substantiation, development and implementation of the system for monitoring the energy efficiency of operated irrigation pumping stations, providing information on the consumption and supply of electricity in real time, as well as an integrated photovoltaic system for the energy supply of pumping stations' personal needs. 29 large pumping stations in seven regions of the Republic were selected as research objects: Bukhara, Navoi, Surkhandarya, Jizzakh, Andijan, Namangan, and Ferghana regions, which have great economic and strategic importance for their regions. The smart device was developed to determine the flow rate and volume of water pumped by pumping stations, its laboratory and field tests were carried out, and the certificate of quality compliance was obtained. The devices were implemented at all selected objects. The implementation of the developed monitoring system of pumping stations made it possible to quickly and efficiently manage the entire system of irrigation pumping stations, reduced annual energy consumption on 2,6% by monitoring unauthorized connection of units, registration and theft of electricity, providing electricity for personal needs of pumping stations with the help of developed and implemented mobile photovoltaic systems, as well as the introduction of effective operating modes in each pumping station. It also made it possible to accurately determine and regulate the volume of pumped water, taking into account the flow turbidity, reduce the labor costs of maintenance personnel by 14% to remove the meter readings, register in magazines, transfer them to the Pumping Stations Department, etc., which ultimately reduced operating costs at operated irrigation pumping stations in Uzbekistan by 9.8%, and also increased reliability of providing the necessary amount of water to irrigated lands.

Keywords: Electricity consumption, Monitoring system, Pumping station, Smart device, Photovoltaic installation, Irrigation system

Introduction

Global warming negatively affects the amount of water resources in the Central Asian region, which is confirmed by climate change, a decrease and uneven distribution of precipitation over the past two decades [1-3]. Due to this, from year to year, the shortage of water and energy resources is felt in all countries of the region, in particular in Uzbekistan [4,5]. On the other hand, over the past 30 years, the population of Central Asia has increased from 51.2 to 78.7 million (53.7%), the largest demographic growth in the region was observed in Uzbekistan, from 21.7 to 36.5 million (68%) that requires correspondingly large water and energy resources. The main water resources of the region are the transboundary rivers Amudarya and Syrdarya, and if we take into account that their long-term observed average annual flow is 116.4 billion m³, it is obvious that from year to year less and less water per capita will fall. Therefore, one of the most important tasks of the region is the rational use of water resources, which depends directly on the introduction of a smart system for accounting and controlling the consumption of water consumed in each country.

Uzbekistan consumes annually an average of 51-54 billion.m³ of water, about 90% of which is consumed in agriculture. For more than 30 years, the area of irrigated land in Uzbekistan is about 4.3 million hectares, of which 2.3 million hectares are irrigated with the help of 1,693 irrigation pumping stations, which are on the balance sheet of the Ministry of Water Resources of Uzbekistan [6]. As a result of the location of most irrigated lands much higher than the water sources level, in some areas it is necessary to raise water with pumping stations cascades. Certainly, this effects on the pumped water amount and electricity consumption of irrigation pumping stations. According to the statistics of the Ministry of Water Resources, annually about 52-56 billion.m³ are pumped by pumping stations of water, which consumes 8-8.2 billion kWh of electricity or about 11% of all electricity generated in the republic. With such high rates of water supply and energy consumption at pumping stations, there are following basic problems as:

- accounting of energy consumption is carried out manually, which consumes a large amount of time of the operating personnel [7];
- most pumping stations do not have water flow meters, most of the installed ones are also out of working condition;
- the main water sources of the region (Amudarya, Syrdarya, Zarafshan) contain various amounts of suspended and bottom sediments, a certain amount of which, due to various reasons, is pumped directly together with water and is not taken into account at all when determining the total volume of raised water [8];
- lack of scientifically proven effective operating modes of pumping stations, especially at those pumping stations where pumping units are connected in parallel to a common pressure pipeline [9].

Analysis of the existing monitoring system and organization of work in irrigation pumping stations showed the following disadvantages:

- there is no automatic registration of readings of control and measuring devices at pumping stations with its transfer to computers for processing;
- readings are processed manually, which leads to significant working time;
- documentation is not unified (it contains a large number of different forms; terminology used in documents is not ordered, its unity is not observed; information in documents is often duplicated; there is a redundancy of information in documents, as well as documents themselves), which leads to a significant waste of working time by employees;
- business documentation is created mainly manually, by registering in various journals, in connection with which there is late registration, as well as a significant waste of working time associated with routine work.
- business information from the MVR to the pumping stations and back is transmitted exclusively via the telephone network, in connection with which there is a defect in the work associated with technical failures in the network and the risk of a "human factor" when receiving and sending information.
- low degree of automation of managerial work in general.

As a result, there is no possibility of monitoring the energy efficiency of the pumping station operation in real time. In addition, irrigation pumping stations also consume 1-3% of electricity from the total annual consumption for personal needs. All this leads to an increase in the annual consumption of electricity by pumping stations.

Therefore, the main purpose of the research was the development and implementation of the energy efficiency monitoring system of operated irrigation pumping stations, including the installation of smart devices on them to account for the flow and turbidity of pumped water, the consumption of electricity consumed by pumping stations, as well as the development and implementation of a mobile photovoltaic installation to cover the electricity consumed for their personal needs.

Objects and Methods

Based on the purpose and objectives of the research, the following scientific and technical solutions have been implemented:

1. The survey has been conducted of 29 large irrigation pumping stations.
2. The design of the intelligent device for accounting of water consumption has been developed, manufactured and implemented at irrigation pumping stations.
3. Software has been developed for the online energy efficiency monitoring system of pumping stations, as well as the mobile application for water management workers and farmers for online information about water consumption in machine channels supplied by pumping stations.
4. Intelligent metering devices for the flow of pumped water and its turbidity have been installed at 29 large irrigation pumping stations.

5. Based on scientific and feasibility studies, mobile photovoltaic systems have been installed to cover the personal needs of each of the 29 large pumping stations.

6. Scientifically justified and recommended energy-efficient operating modes for each of the selected 29 large pumping stations.

7. The energy efficiency monitoring system of pumping stations has been installed and implemented.

8. The implemented monitoring system has been tested during the vegetation season.

Research have been implemented at large pumping stations in seven regions of the republic, such as pumping stations "Alat", "Soktari", "Yomonjar", "Karakul", "Paykent" and "Jondor-3" in Bukhara region, "Kanimeh-1", "Urtachul" and "Navoi" in Navoi region, "Amu-Zang-1", "Amu-Zang-2", "Babatag", "Jaykhun" and "Sherabad" in Surkhandarya region, "DGNS", "DNS-2" and "DNS-3" in Jizzakh region, "Obi-Khayat", "Raish-Hakent-1", "Ulugnar", "Gulbakhor-1p", "Asaka-Adir", "Raish-Hakent-2" and "Guliston" in Andijan region, "Namangan", "Buloqboshi" and "Rezaksoy-3" in Namangan region, as well as "Furkat-1" and "Dangara" in Fergana region. In total have been covered 29 large irrigation pumping stations with great economic and strategic importance for their regions. Currently, all other irrigation pumping stations are gradually connected to the online monitoring system.

Results and Discussion

Based on the objectives of the research, the following tasks were set:

1. Development and implementation of the smart device for determining the water flow rate and its turbidity pumped by pumping stations.

2. Development software and its mobile application for the online system for monitoring the energy efficiency of pumping stations for water management workers and farmers to inform about the water consumption supplied by pumping stations at the moment.

3. Installation mobile photovoltaic systems developed by the research participants to meet the personal needs of each of the 29 large pumping stations.

4. Determination of scientifically based energy efficient operating modes for each of the selected 29 pumping stations.

5. Implement the developed energy efficiency monitoring system at pumping stations.

6. Testing the implemented monitoring system during the operation of pumping stations in the vegetation season.

3.1 Development and implementation of the smart device for determining the flow rate and volume of water pumped by pumping stations.

To solve the above problem, we have developed a smart device that measures the water flow rate in channels with high accuracy and sends information online for several years [10]. The proposed smart device is included following components:

As a sensitive element of a smart device has been used the MaxiBotix MB7580 ultrasonic range finder (Fig. 1). This meter has the ability to reduce the effects of condensation and freezing during continuous operation in a closed room or in a high humidity environment, measure to the millimeter, detect short and long distances, and have a reading speed of 0.6 Hz. And the output signal can be pulse width, analog voltage, or TTL series. In addition, this sensor has a compact and durable PVC housing that meets the IP67 waterproof standard.

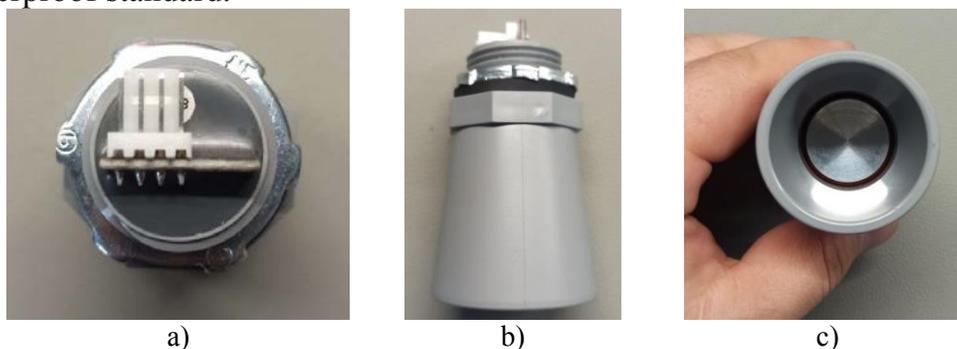


Fig. 1. Ultrasonic Rangefinder MB7580: a) top view; b) side view; c) bottom view.

The integrated circuit MAX 485 converts the signal received from the meter based on the UART protocol into the RS-485 protocol for the control controller (Fig. 2). There are various options for the package of this microcircuit, and the choice of the most compact one for this project allows us to reduce the dimensions of the overall control unit [11].



Fig. 2. MAX485 Integrated Circuit with SOP.

The LTC3105 converter is used as an uninterruptible power supply for continuous operation of the sensor as a charger for a solar battery [12, 13, 14]. A standard electrical circuit is proposed (Fig. 3).

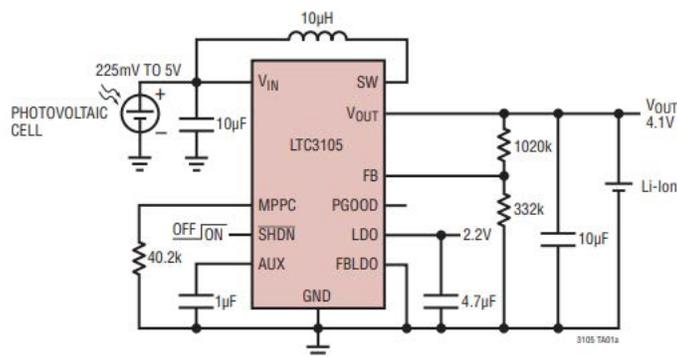


Fig. 3. LTC3105 Battery Charging Converter Schematic Diagram.

The services of mobile operators are used for remote transmission of the received information via the communication channel. Thus, the problem of reliable wireless reception of information over long distances is solved. To increase the reliability of communication, the SIM 868 module was used (Fig. 4), which has the ability to connect to at least two companies [15]. The SIM868 module is a full-fledged quad-band GSM/GPRS module, which also includes GNSS technology for satellite navigation. The compact design with LCC and LGA platforms saves a lot of time and money when developing GNSS based applications.



Fig. 4. SIM868 module

Since some irrigation pumping stations in Uzbekistan are located far from residential areas, the signals of mobile operators in these areas are very weak or absent altogether. To solve this problem, LoRa technology was used (Fig. 5), which provides continuous data exchange, albeit at a low speed [16, 17, 18].

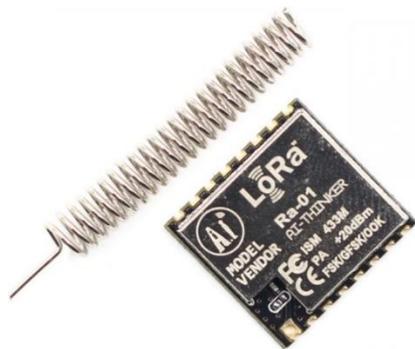


Fig. 5. LoRa module and its antenna.

The memory unit XTSD01G was used as a data storage device, it takes measurements offline and stores all data in its memory, prevents data loss when exchanging information with the server due to lack of communication. The advantage of the memory unit XTSD01G is its low cost, small size and sufficient reliability (Fig. 6). The type of memory of this device with a capacity of 128 MB allows you to store long-term data.

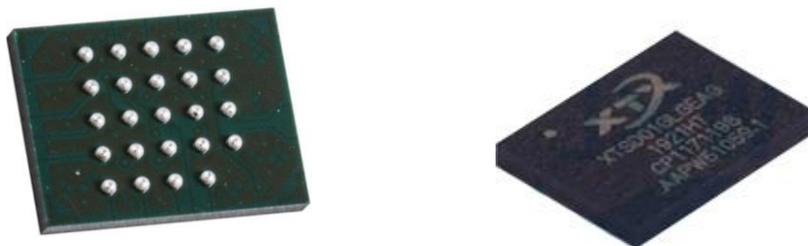


Fig. 6. Memory unit XTSD01G.

The STM32L151RCT6 microcontroller is the preferred solution for combining all the elements and performing the control task (Fig. 7). This microcontroller is 32-bit and has 256 KB of flash memory. In addition, this microcontroller is efficient for battery life as it requires very little power.



Fig. 7. The smart device for determining water flow is able to measure the water level in open channels and rivers and calculate its flow and volume (Fig. 8). It is equipped with a GSM module for rapid data transmission to the server.

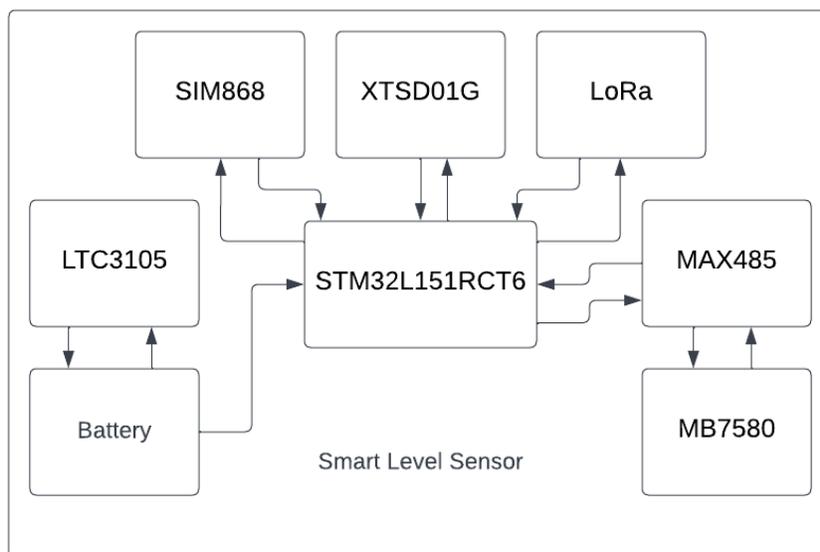


Fig. 8. Structure of the smart device for determining water flow.

It works completely independently of any power source as it contains a solar panel and a rechargeable battery. For the sensor to work correctly, you need to install it correctly and insert a SIM card that works with a 2G connection. The industrial sample of the device is shown in the Fig. 9.



Fig. 9. The industrial sample of the smart device for determining water flow.

The industrial sample of the smart device for determining water flow was created and successfully passed laboratory tests (Fig. 10).

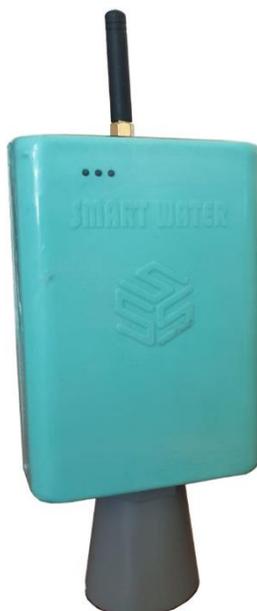


Fig. 10. Industrial example of the smart device for determining water flow.

At the same time, according to the Law of the Republic of Uzbekistan "On Inventions, Utility Models, and Industrial Designs", the developed utility model of the water level control system was patented by the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan, and copyright was protected by law [19]. For the operation of this smart device, a unique program was developed, for which a certificate was obtained from the Intellectual Property Agency under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan [20]. The smart device was tested and certified by the National Certification Center of the Republic of Uzbekistan [21], and permission was obtained for its mass production. At present, the smart devices for determining water flow have been installed in more than 3,000 irrigation canals on the territory of Uzbekistan (Fig. 11).



Fig. 21. Smart devices for determining water flow installed on the irrigation canals.

These devices have been operating for the last three years in real conditions with a given accuracy within their technical specifications. This, in turn, allows you to determine the parameters necessary to monitor pumping stations and evaluate their efficiency in real time. In addition, these devices from domestic manufacturers have advantages over their imported counterparts due to their low cost, the availability of customization options, and their easy adaptation to difficult conditions. At the same time, all the problems identified during the operation of the devices are studied from a scientific and technical point of view.

The graphs below show the processes of intelligent filtering of noisy signals, in which the selection of the optimal filtering algorithm is performed automatically based on the program included in the smart device. The signal shown in blue in the graphs represents the noise being generated. The red line shows the filtering result. Information is received by measuring 5 times per second. The received information is passed through various filtering algorithms. For this process, the device found the structure of three consecutive filtering blocks to be optimal, and the information filtering processes in it were carried out in the following order: Fig. 12a. The signal obtained from the primary filtering unit, Fig. 12b. The signal obtained from the secondary filtering unit, Fig. 12s. The signal received from the tertiary filtering unit.

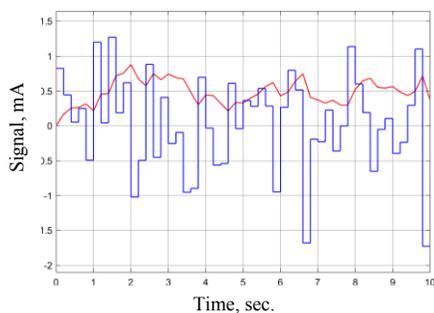


Fig. 32a. Filtering result 1.

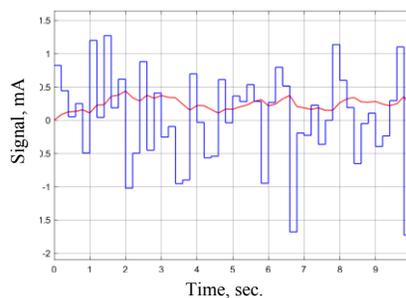


Fig. 42b. Filtering result 2.

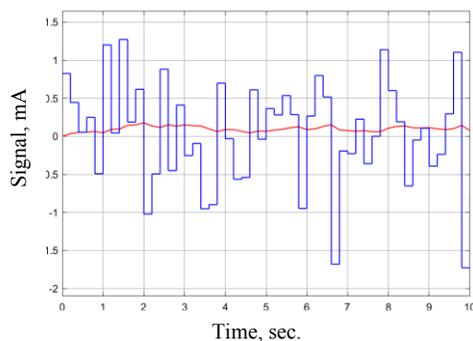


Fig. 52c. Filtering result 3.

The results show that the stabilization of received signals is improved by 74.2% due to the use of intelligent filtering algorithms in a smart device. The reliability of information decreased by 8.2% in total.

3.2 Development software and its mobile application for the online energy efficiency monitoring system of pumping stations.

In the arid landscapes of Uzbekistan, where water is a precious resource for agriculture, the efficiency of irrigation pumping stations plays a pivotal role in sustainable farming practices. Recognizing the significance of this, a state-of-the-art monitoring system has been developed to track and analyze the energy efficiency of irrigation pumping stations across the country. This system not only monitors essential parameters such as water flow rate and electricity usage but also offers valuable insights into the turbidity levels of pumped water in real-time.

The system includes all the main parameters of the operated reclamation pumping stations, which are on the balance sheet of the Ministry of Water Resources of Uzbekistan. It is designed to receive, process and transmit information about the flow rate, volume and turbidity of the pumped water, the amount of electricity consumed and its limit, shows changes in flow rate and turbidity over a certain period of time, and also demonstrates the curve of specific electricity consumption when pumping 1000 m³ of water per 1 m of lifting height. Based on these data, the operational personnel of pumping stations, as well as the regional management of pumping stations, have the opportunity to manage them rapidly, which directly affects the quality and efficiency of water supply to consumers.

The system has the ability to provide daily, monthly and annual analytical data coming from smart devices installed at pumping stations.

3.2.1 Daily Monitoring

Users can access real-time data on a daily basis, allowing for immediate response to any irregularities or inefficiencies in the pumping stations (Fig. 13). This feature aids in prompt decision-making and ensures that the agricultural operations remain on track. In addition to providing real-time data, the system offers remote monitoring capabilities. Farmers, agricultural engineers, and authorities can access the monitoring platform from any location, using desktop computers or mobile devices. This remote accessibility is crucial for decision-makers who need to oversee multiple pumping stations across vast agricultural areas. With the ability to monitor operations remotely, stakeholders can promptly identify and address challenges without being physically present at each location. To facilitate quick decision-making, the system's user interface features intuitive dashboards and visualizations. Key metrics are presented in a clear and accessible format, allowing users to grasp the status of pumping stations at a glance. Color-coded indicators, charts, and graphs provide a visual representation of data trends, making it easier for users to identify and address any operational irregularities promptly.



Fig. 63. Daily monitoring example of the system.

3.2.2 Monthly Monitoring

Monthly monitoring provides a broader perspective on trends and performance metrics (Fig. 14). These reports are instrumental in long-term planning, helping farmers and authorities to identify seasonal patterns and implement strategies to enhance overall efficiency. Monthly reports aggregate data over specific time intervals, enabling users to discern recurring patterns and trends. Farmers and authorities can gain insights into how irrigation and energy consumption vary across different seasons. Understanding these seasonal fluctuations is crucial for adapting agricultural practices to the changing needs of crops and optimizing resource usage accordingly.



Fig. 74 Monthly monitoring example of the system.

3.2.3 Annually Monitoring

Yearly data analysis offers a comprehensive overview of the irrigation pumping stations' performance (Fig. 15). This macroscopic view allows for the identification of areas of improvement over an extended period, contributing to the development of sustainable agricultural practices.

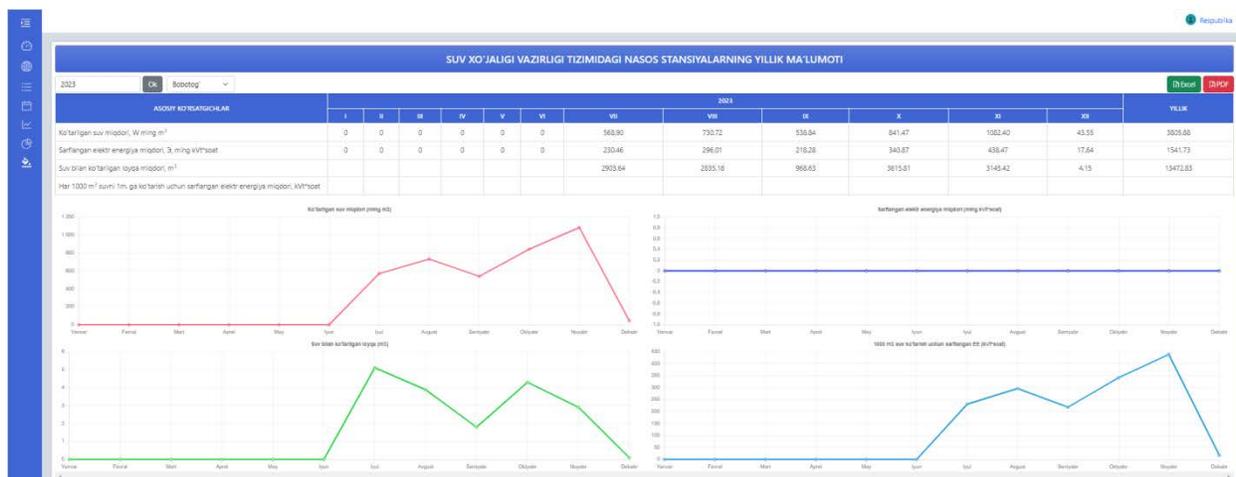


Fig. 85. Annually monitoring example of the system.

The system is also adapted to provide in electronic and printed form all daily, monthly and annual data in tabular form for reports.

To provide accessibility to a wider audience, the monitoring system is being optimized for mobile devices. This ensures that farmers, even in remote areas with limited internet access, can easily engage with the platform. Mobile compatibility empowers farmers to receive real-time updates, access reports, and make informed decisions right from their fields, fostering a sense of ownership and empowerment.

3.3 Installation mobile photovoltaic systems developed by the research participants to meet the personal needs of each pumping stations.

Irrigation pumping stations annually consume about 1-3% of the total amount of electricity consumed for their own needs, which is mainly spent on auxiliary systems (drainage system, lighting system, etc.) [21]. Sometimes an accident in the power system or other unforeseen circumstances leave the pumping station without electricity for some time (in rare cases for several days), which can lead to flooding of the underground part with filtration waters without pumping them out. The mobile photovoltaic system has been proposed to solve this problem (Fig. 15). Since the average number of sunny days per year in Uzbekistan is 300-320 days.

The power of the system is 2000 W (4 panels of 500W each), it has 4 helium batteries of 200 Ah (full capacity of 800 Ah), a 3 kW inverter, an air cooling system in summer and 2 electrical

outlets (Fig. 16). A trolley of its own design serves as a mobile platform of the installation, it makes it possible to freely move around the territory of the pumping station to supply the generated electricity directly to the consuming equipment. Also, the mobile platform makes it possible to increase electricity generation during the day by directing solar panels perpendicular to the sun by the service personnel of the pumping station. In addition, the solar panels have the ability to adjust the angle of inclination relative to the sun from 0 to 45 degrees. 1 photovoltaic installation was manufactured and supplied for each of the 29 pumping stations.



Fig. 16. General view of the photovoltaic system installed at pumping stations.

To pump out the drainage system, together with the photovoltaic system, 1 submersible centrifugal pump with head of 8-12 m, flow rate of 20-30 m³/h and power of 750 W were supplied for each pumping station. The pumps have an automatic float on-off system, which makes it possible for the pumps to operate automatically in the drainage well of the pumping station, depending on the water level in it.

Observations of installed mobile photovoltaic systems at pumping stations during the vegetation season showed that 75-80% of the generated electricity was spent on submersible pumps as the supply by pumping stations increased, since the amount of filtration water from the pump seals increased. The remaining 20-25% of the generated electricity was spent on lighting the pumping station building at night. In winter, when the main pumping units are shut down, filtration in the engine room of the pumping station is minimized and 72-77% of the output is already spent on the building lighting and personal needs of the operating personnel.

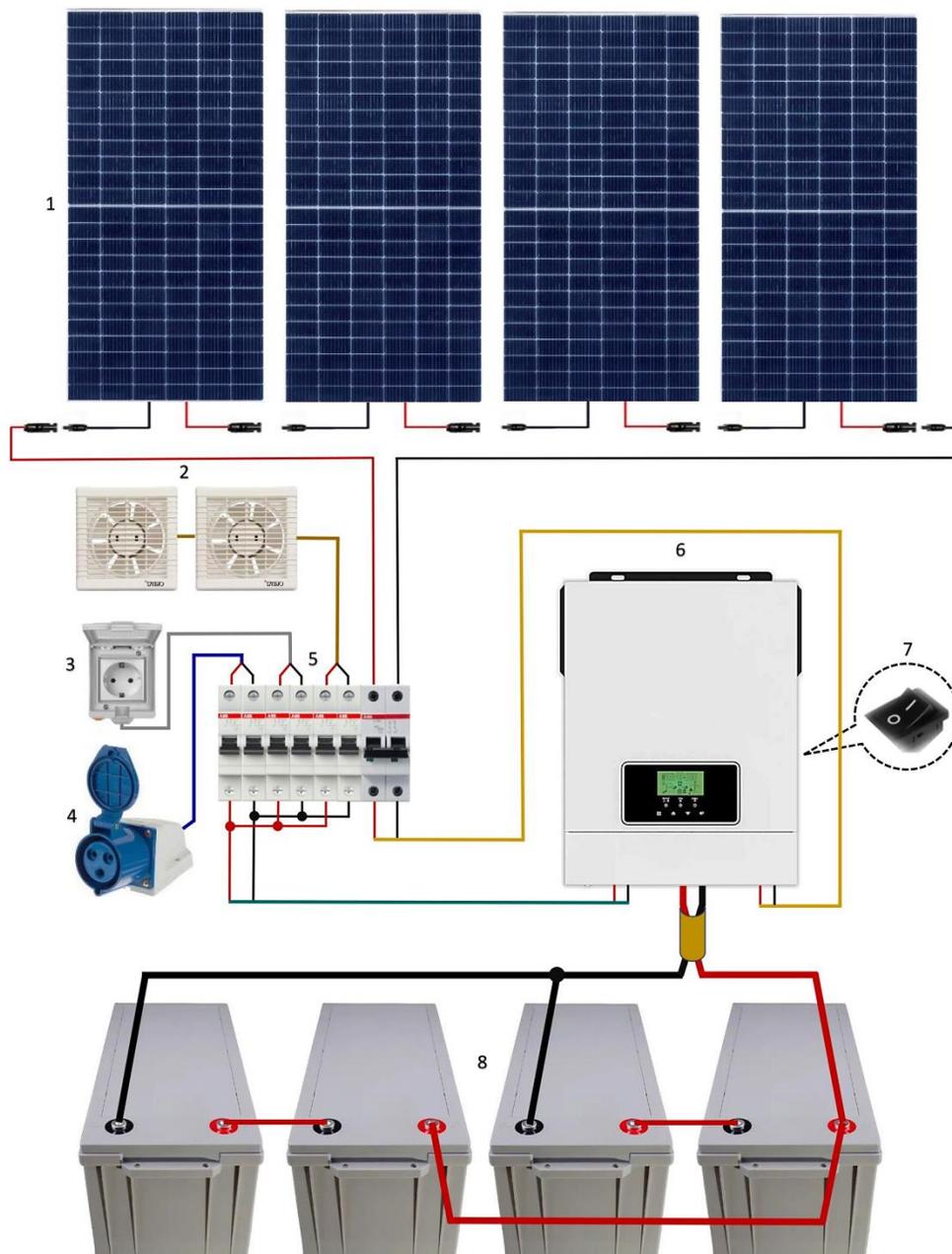


Fig. 17. Connection scheme of the mobile photovoltaic system elements.

Here: 1. Photovoltaic panels; 2. Fans; 3. Socket with protective cover; 4. Stationary socket; 5. Automatic switcher; 6. Inverter; 7. Inverter switch; 8. Helium batteries.

3.4 Determination of scientifically based energy efficient operating modes for each of the selected 29 pumping stations.

The energy-efficient mode of pumping stations operation is understood as the mode of operation in which the power consumption (for the rotation of electric motors and pumps, for overcoming hydraulic resistances of pipelines, for the correct organization of operation and repair), including for own needs, will be relatively minimal. The energy-efficient operation of pumping stations is influenced by design (type of pump and pumping station, design (shaped parts) of the pressure pipeline, the degree of opening of the gates, etc.) and operational (hydrology of the source and supply channel, the presence of floating debris, bottom and suspended sediments in the water, the technical condition of the pumping station node structures, the condition of the discharge channels, etc.) factors. The greatest changes in power consumption are observed at those pumping stations where several pumping units are connected in parallel to a common pressure pipeline.

Studies have shown that at large pumping stations "Amu-Bukhara-1" of the Bukhara region and "Namangan" of the Namangan region, with an increase in the number of parallel pumping units, the power consumption coming to one unit increases by 0.72...6.53%, and at pumping stations "Amu-Bukhara-2" of the Bukhara region and "Amu-Zang-2" of Surkhandarya region, on the contrary, decreases by 0.32...1.67% [1]. Based on design and technical, regulatory and cadastral data, as well as data from field surveys, the research team members have been developed and recommend energy-efficient operating modes for all 29 large pumping stations for implementation. The effectiveness of the recommended regime have been proved by the monitoring system of pumping stations during the vegetative season. Comparative data have shown the main advantages and possible disadvantages of the implemented monitoring system, as well as improved operating modes of pumping stations.

3.5 Implement the developed energy efficiency monitoring system at pumping stations.

The implementation of the monitoring system was carried out alternately from the moment the devices were installed at pumping stations. Signals from all installed smart devices at 29 large pumping stations were received and processed using a developed program. The scheme of information interaction of the main components of the monitoring system of pumping stations of the Ministry of Water Resources (MWR) of the Republic of Uzbekistan is shown in Fig. 13.

The implementation of the developed monitoring system reduced labor costs at pumping stations:

- 100% on the removal of indicators of metering devices for electricity consumption, registration in logs, transmission to the PSD, because these functions have been fully automated;

- 100% on the preparation of the document "permission to change the limit", because the function have been fully automated;

- 100% on the compilation of daily, monthly and for any period reports on the consumed electricity.

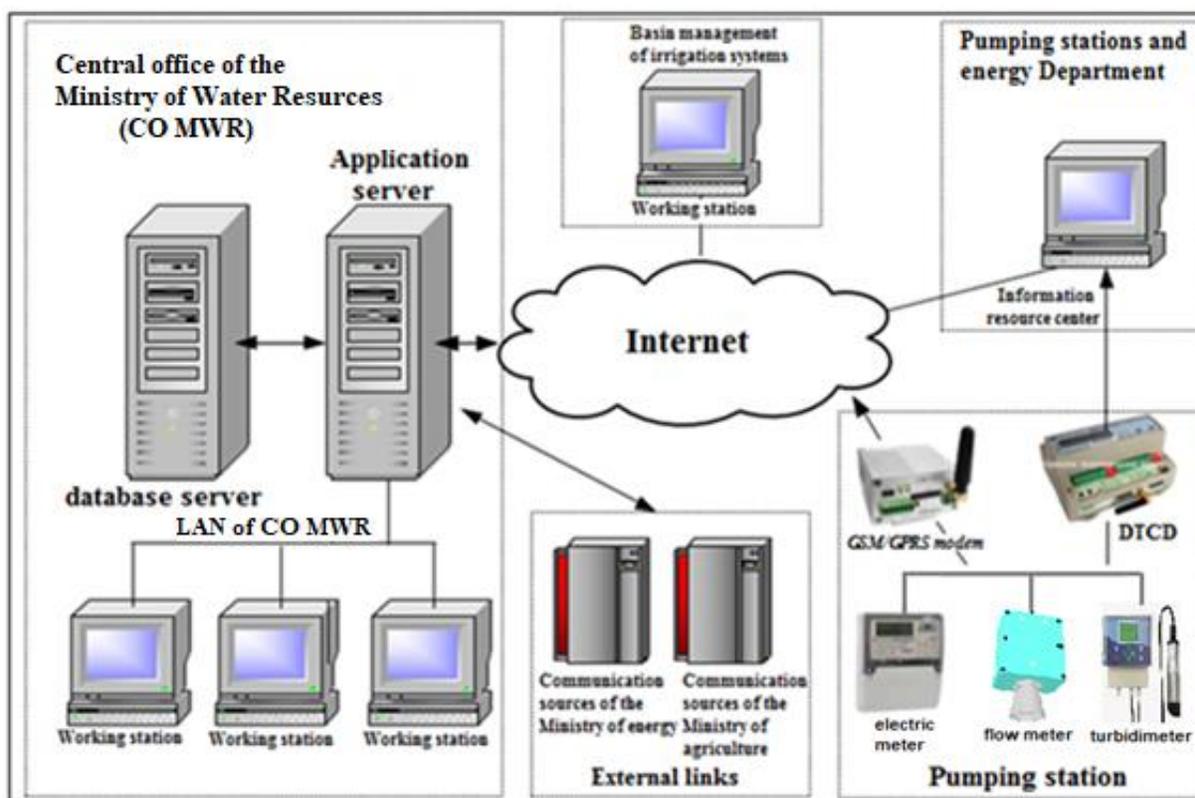


Fig. 98. The scheme of information interaction of the system main components.

In the PSD:

- 100% on the preparation of daily summary data on electricity consumed by the PSD and transmission to the CO MWR, because the function have been fully automated;
- 100% on the compilation of summary reports of daily, monthly and for any period on the electricity consumed;
- by 80% for setting the task to turn on/off the pumping units.

In CO MWR:

- 100% on the compilation of summary reports of daily, monthly and for any period on the electricity consumed;
- by 80% for the installation to allow the change of the electricity limit.

In addition, the installation of water flow metering devices makes it possible to receive real-time information about the flow rate of pumped water by pumping stations, taking into account the flow turbidity, promptly respond and adjust their operation.

3.6 Testing the implemented monitoring system during the operation of pumping stations in the vegetation season.

In addition to some large irrigation pumping stations operated year-round, such as Amu-Zang-1, Amu-Zang-2, DGNS and others, most pumping stations are operated mainly

during the growing season. Therefore, tests of the monitoring system were carried out during the growing season with simultaneous operation of all pumping stations. The monitoring was carried out by specialists from the research group and the Pumping Stations Department of the Ministry of Water Resources. Operation monitoring of each pumping station was carried out in the usual operating modes used by the service personnel. The implementation of the monitoring system has provided following advantages:

- eliminated discrepancies in data on the water flow rate in canals between the data of pumping stations and local irrigation system administrations, since before the implementation of the system, each organization determined the water flow rate in canals independently and there were always disagreements between them in its quantity;
- made it possible for all interested parties to receive information about the flow rate, volume and turbidity of pumped water by pumping stations online;
- reduced the routine work of the pumping station's operating personnel on taking meter readings, calculating data, preparing and transmitting reporting data;
- increased the reliability and efficiency of decision-making on the management of pumping stations;
- eliminated unplanned switching on of pumping units;
- increased the reliability and timeliness of water supply to consumers;
- reduced annual electricity consumption by pumping stations by an average of 2.1%;
- made it possible to analyze the energy efficiency level of each operated pumping station.

The monitoring system is aimed at covering all 1,693 pumping stations that are on the balance sheet of the Ministry of Water Resources. In the future, as measuring instruments are installed at pumping stations and installations owned by water user societies, clusters and farmers, they can also be connected to the developed system.

Conclusions

As a result of the scientifically-experimental studies the following conclusions can be drawn:

1. The smart device for determining water flow rate is designed to work in harsh continental climates, perform high-precision measurements even in extremely hot and extremely cold conditions, have the functions of remote transmission of information, and, if necessary, have the functions of storing information. An in-memory archive, even when it cannot be transferred over a distance due to certain external influences, prevents data loss.

2. The industrial sample of the device was tested and certified in laboratory and field conditions and in the national certification center of the Republic of Uzbekistan, and permission was obtained for its mass production.

3. Since the smart device is produced by domestic manufacturers, its price is reduced by 42.7% compared to imported analogues.

4. As a scientific novelty of the work, it is possible to recognize the intelligent filter algorithm developed for filtering information measured by a smart device. As a results, the stabilization of received signals is improved by 74.2% due to the use of intelligent filtering algorithms in a smart device. The reliability of information decreased by 8.2% in total. This result is less than the 9.5% target for information reliability.

5. The developed monitoring system and its mobile application are adapted to provide water management workers, farmers and other interested persons with online information on the flow rate, volume, turbidity of pumped water, as well as the amount of electricity consumed by irrigation pumping stations.

6. It reduced by 14% the labor costs of maintenance personnel to take meter readings, register in magazines, transfer them to the pumping station department, etc., which ultimately reduced the operating costs of operating irrigation pumping stations in Uzbekistan by 9.8%, and also increased the reliability of supplying the required amount of water to irrigated lands.

7. Observations of installed mobile photovoltaic systems at pumping stations during the growing season showed that 75-80% of the electricity generated was spent on submersible pumps, and the remaining 20-25% on lighting the pumping station building at night.

8. During the non-vegetation season, when the main pumping units are switched off, filtration in the engine room of the pumping station is minimized, and 72-77% of the output is already spent on lighting the building and personal needs of maintenance personnel.

9. The implementation of the monitoring system has reduced the annual electricity consumption of pumping stations by an average of 2.1%.

Acknowledgments

This publication has been produced within the framework of the Grant “Energy efficiency monitoring system of operated irrigation pumping stations in Uzbekistan”, funded under the MUNIS Project, supported by the World Bank and the Government of the Republic of Uzbekistan. The statements do not necessarily reflect the official position of the World Bank and the Government of the Republic of Uzbekistan.

References

- Aizebeokhai, A. P. (2009). Global warming and climate change: realities, uncertainties and measures. *International Journal of Physical Sciences*, **4(13)**, 868–879. <https://doi.org/10.5897/IJPS.9000283>
- Annina Sorg, Tobias Bolch, Markus Stoffel, O. S. & M. B. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, **2**, 725–731.

- D Karthe, S Chalov, D. B. (2015). Water resources and their management in central Asia in the early twenty first century: status, challenges and future prospects. *Environmental Earth Sciences*, **73**, 487–499.
- Zhi Li, Yaning Chen, Weihong Li, Haijun Deng, and Gonghuan Fang. (2020). Potential impacts of climate change on vegetation dynamics in Central Asia. *JGR: Atmospheres*, **120(24)**, 12345–12356. <https://doi.org/10.1002/2015JD023618>
- Speeches of Uzbekistan delegation at the international seminar “Impact of glacier melting on water resources state in Central Asia in climate change context.” (2016)
- N.Ikramov, T.Majidov, M.Mamajonov, O.Chulponov.(2021) Hydro-abrasive wear reduction of irrigation pumping units. *E3S Web of Conferences*, **264**, 03019
- N. Ikramov, T. Majidov, E. Kan, and A. Mukhammadjonov. (2020) Monitoring system for electricity consumption at pumping stations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **883(1)**, 012101
- N. Ikramov, T. Majidov, E. Kan, and D.Akhunov.(2021) The height of the pumping unit suction pipe inlet relative to the riverbed bottom. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1030**, 012125
- N. Ikramov, Majidov T., Kan E. (2019) Effect of parallel connection of pumping units on operating costs of pumping station. *E3S Web of Conferences*, **Volume 97**
- F.Kasimov, A.Mukhamadjonov, T.Majidov. (2023) Intelligent device for measuring water level in irrigation channels of constant section. *E3S Web of Conferences*, **401**, 01012
- A. Flammini, P. Ferrari, E. Sisinni, D. Marioli, and A. Taroni. (2002) Sensor interfaces: from field-bus to Ethernet and Internet. *Sensors and Actuators A: Physical*, **101(1–2)**, 194–202
- M. Bathre and P. K. Das. (2022) Water supply monitoring system with self-powered LoRa based wireless sensor system powered by solar and hydroelectric energy harvester. *Computer Standards and Interfaces*, **82**, 103630
- Y. El Hmamsy, C. Ennawaoui, E. M. Laadissi, E. M. Loualid, and A. Hajjaji. (2022) Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using DC/DC converter. *Materials Today: Proceedings*, **66**, 473–478
- F. Hoffart. Tiny 2-cell solar panel charges batteries in compact, off-grid devices. *Analog Circuit Design*, Elsevier, pp. 477–478 (2023)
- S. Nooruddin, Md. Milon Islam, and F. A. Sharna. (2020) An IoT based device-type invariant fall detection system. *Internet of Things*, **9**, 100130
- H. Mroue et al. LoRa+: An extension of LoRaWAN protocol to reduce infrastructure costs by improving the Quality of Service. *Internet of Things*, **9**, 100176 (2020)
- R. S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang. (2017) A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, **3(1)**, 14–21

- A. Kochhar and N. Kumar. (2019) Wireless sensor networks for greenhouses: An end-to-end review. *Computers and Electronics in Agriculture*, **163**, 104877
- Ahmadjonov V. M., Fozilov I. I., Abdulazizov F. X., Kadamov S., Choriev N. F., Mukhamadjanov A. U., Gafarova A. I., and Fathulloev A. M. (2020) Water level control system. The patent for a utility model was granted in accordance with the Law of the Republic of Uzbekistan "On Inventions, Utility Models and Industrial Samples". №FAP 01982
- Ahmadjonov V. M., Fozilov I. I., F. H. Abdulazizov S. Shagov, N. F. Choriev, A. U. Mukhamadjonov. (2020) Certificate of official registration of the computer program for Smart water, DGU 10262
- Certificate of approval Ultrasonic Smart water level gauge. Uzstandart Agency, №O'T 0000577, Ts 29243261-01:2021 (2021)

УДК 630.2:631.43

ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ

Ильинцев А.С.¹, Наквасина Е.Н.²

¹Северный НИИ лесного хозяйства, Архангельск, Российская Федерация
a.ilintsev@narfu.ru

²САФУ имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация
nakvasina@yandex.ru

SOIL AND ENVIRONMENTAL ASPECTS OF IMPROVING REFORESTATION TECHNOLOGIES

Ilintsev A.S.¹, Nakvasina E.N.²

¹Northern Research Institute of Forestry, Arkhangelsk, Russia

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

Annotation: The methods of site preparation receive a lot of attention in artificial reforestation. The mounds have heterogeneous soil properties, which are associated with the structure of the root soil layer. It is necessary to take into account these physical properties of the soil when planting forest crops in these mounds.

Введение

При разработке новых и совершенствовании имеющихся технологий лесовосстановления необходимо учитывать все компоненты и их естественные способности, определяющие восстановление леса (Стратегия..., 2008; Желдак и др., 2020). Поэтому все чаще исследователи стали обращать внимание на экосистемную парадигму развития лесного хозяйства (Puettmann et al., 2007), ожидая стирание грани между экологической и технологической составляющей лесовосстановления (Мерзленко, 2017). Большое значение это имеет при проведении лесохозяйственных мероприятий, в том числе лесовосстановлении.

При искусственном лесовосстановлении особое внимание следует обращать на обработку почвы (Касимов и др., 2009; Мочалов, Бобушкина, 2021), которая обеспечит высокую приживаемость и рост посадочного/посевного материала, снизит агротехнические уходы. Среди применяемых способов обработки почвы в последнее время наибольшие преимущества получают пласты и микроповышения, которые во многих условиях дают лучшие результаты по приживаемости и росту лесных культур (Суворов, 1972; Сахнов и др., 2023). Однако именно они наиболее сильно изменяют почвенные свойства в посадочных местах (Касимов и др., 2009).

В настоящее время особое внимание ученых привлекает способ подготовки почвы под лесные культуры с помощью экскаваторов, которые позволяют обрабатывать почву дискретными микроповышениями и проводить как ручную, так и механизированную посадку семян. При использовании стандартного ковша

экскаватора дискретное микроповышение имеет размеры 1 на 1 м, своеобразную форму (с углублениями и склонами) и переслоенную почву. Исследования, проведенные в различных типах лесорастительных условиях средней тайги (Ильинцев и др., 2024) показали, что физические свойства почвы в микроповышениях отличаются от естественных (не затронутых лесохозяйственными преобразованиями). Так, плотность сложения корнеобитаемого слоя в микроповышениях выше на 8% по сравнению с нетронутыми участками почвы, а влажность ниже на 11%. Как результат подготовки микроповышения ковшом экскаватора, несколько снижается общая пористость, но увеличивается пористость аэрации.

В то же время, для лесохозяйственных работ важно выяснить условия в посадочных местах в пределах микроповышения, что позволит определить оптимальные места размещения сеянцев. Это можно проследить, применяя почвенные исследования, и в первую очередь изучив особенности сложения слоев турбированной почвы и физические свойства в корнеобитаемом слое сеянцев в разных местах их локализации в микроповышении.

Цель исследований – изучить физические свойства почв в корнеобитаемом слое в различных местах произрастания сеянцев в пределах микроповышений, созданных экскаваторами в таежной зоне.

Объекты и методы

Исследования проводили на лесокультурной площади в черничном типе лесорастительных условий подзоны средней тайги Архангельской области. Почва – мелкоподзолистая иллювиально-железистая супесчаная на среднем суглинке.

Обработка почвы проведена тяжелыми экскаваторами с применением стандартного ковша объемом около 1 м³ методом нерядового дискретного создания микроповышений через 1,0-1,5 м. Экскаватор формировал микроповышения шириной в среднем 0,9 (от 0,7 до 1,1 м) и длиной 1,1 м (от 0,8 до 1,4 м). Приподнятые посадочные места на 10-30 см состояли из перевернутого слоя лесной подстилки, расположенной на нижележащей неповрежденной лесной подстилке, и покрыты минеральной почвой. Почва была обработана весной 2019 года. Летом были посажены 2-летние сеянцы ели с закрытой корневой системой (ЗКС) посадочными трубами. В одно микроповышение высаживалось по 2-3 сеянца для обеспечения 2000 посадочных мест на 1 га. Возраст лесных культур на момент обследования – 5 лет.

Для оценки свойств обработанной почвы отбирали образцы (по 20 шт.) в корнеобитаемом слое почвы (0-20 см) в трех местах микроповышения («у ямы», «в центре» и «от ямы» – см рис. 1), и для сравнения в местах, где не было обработки почвы (типичные условия роста растений).

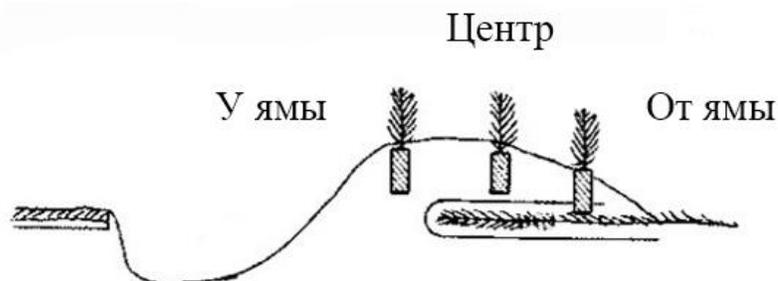


Рис. 1. Места произрастания сеянцев в пределах микроповышения, созданных ковшем экскаватора

Образцы почвы отбирали с помощью металлического цилиндра с режущими краями (бура) объемом $52,78 \text{ см}^3$ (диаметр 4,1 см, длина 4 см). В лабораторных условиях определили по общепринятым методикам полевую влажность почвы, плотность сложения, пористости общую и аэрации.

Для сравнения физических свойств использовали дисперсионный непараметрический анализ Крускала-Уоллиса с последующими множественными сравнениями средних рангов для всех групп. При исследовании использовали 0,05 уровень вероятности. Данные анализировали с помощью программы STATISTICA версии 12.0.

Результаты и обсуждение

При отборе почвы для детального изучения была замечена неоднородность строения корнеобитаемого слоя в различных локациях микроповышения (рис. 2). Так, более высокая изменчивость по гранулометрическому составу почвы в корнеобитаемой толще была на краях микроповышения, где чаще попадает в толщу подзолистый горизонт, смешанный с срединными горизонтами почвы более тяжелого гранулометрического состава. Более выравненные условия по строению турбированной экскаватором толщи в центре создаваемого микроповышения, места посадки в центре микроповышения чаще представлены легким и средним суглинками. Различия в переслоенности в пределах микроповышения связаны с технологией работы ковша экскаватора и с погоризонтным строением лесных почв в регионе. Часто встречаются достаточно мелкие почвы на двухслойных отложениях, развивающиеся на покровной супеси, подстилаемой тяжелыми или средними суглинками (Скляров, Шарова, 1970). Развиваются контактно-глееватые почвы, с формированием второго осветленного/оглеенного горизонта ВС. В результате верхняя часть почвенного профиля может быть относительно легкой по

гранулометрическому составу (идет оподзоливание), а нижняя часть – суглинистая. Захват ковша экскаватора выносит нижние горизонты на построение микроповышения, особенно его срединной части.



Рис. 2. Почвенные прикопки в различных частях микроповышения: а – от ямы, б – в центре, в – у ямы

В результате, изменчивость по гранулометрическому составу сказывается и на физических свойствах почвы (табл. 1), и на росте сеянцев. Для решения практических задач лесовосстановления, важно проследить различия в локальных свойствах в пределах микроповышения, чтобы знать возможности обеспечения растений питательными веществами, связанными с обеспеченностью водно-воздушного режима. Разные физические свойства почвы в локальных местах микроповышений могут отразиться на устойчивости растений после посадки.

Плотность сложения почвы корнеобитаемого слоя в различных местах микроповышения различается не значительно, однако она на 5-6 % выше, чем в местах произрастания растений на пасеке (не нарушенных обработкой). Это связано с особенностями подготовки посадочных мест – экскаватор ковшом прижимает почву.

В то же время установлено влияние места посадки на полевую влажность ($N=11,27$, $p = 0,0103$). Достоверно на 22% снижается влажность в центре микроповышений по сравнению с пасеками ($N = 2,94$, $p = 0,019$), на уровне статистической тенденции – в верхнем крае микроповышения («у ямы») - на 19 % по сравнению с пасеками ($N = 2,55$, $p = 0,061$). Влажность нижнего края микроповышения («от ямы») близка к влажности почвы на пасеке (различия

составляют 6 %). Именно содержание влаги в почве является главным фактором приживаемости и роста растений при посадке на лесокультурную площадь (Бартенев, 2013), обеспечивая поступление питательных веществ. Влияние фактора влажности может быть выше, чем наличие питательных веществ (Nzokou, Stregg, 2010).

Таблица 1. Физические свойства корнеобитаемого слоя почвы в различных местах микроповышения, созданного ковшем экскаватора

Вариант	Среднее значение	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Квартиль 1	Медианное значение	Квартиль 3
Плотность сложения, г/см ³						
Пасека	1,30	0,131	10,0	1,22	1,31	1,39
От ямы	1,28	0,194	15,1	1,13	1,37	1,43
Центр	1,35	0,151	11,2	1,25	1,39	1,44
У ямы	1,31	0,240	18,4	1,10	1,38	1,50
Полевая влажность, %						
Пасека	20,2	4,21	20,9	16,9	18,8	23,3
От ямы	19,3	3,13	16,2	16,5	19,0	22,2
Центр	15,8	3,56	22,5	12,8	17,0	18,1
У ямы	17,2	2,73	15,9	15,4	17,6	18,9
Плотность, г/см ³						
Пасека	2,19	0,137	6,2	2,11	2,20	2,29
От ямы	2,04	0,193	9,4	1,94	2,08	2,22
Центр	2,04	0,168	8,3	1,91	2,04	2,18
У ямы	2,05	0,141	6,9	1,92	2,03	2,15
Пористость общая, %						
Пасека	37,5	10,91	29,1	29,8	35,7	45,9
От ямы	39,4	7,93	20,1	34,6	41,2	44,5
Центр	35,9	12,42	34,5	27,7	34,1	43,9
У ямы	34,6	9,81	28,3	30,4	32,5	42,0
Пористость аэрации, %						
Пасека	13,6	9,43	69,1	7,6	9,4	22,3
От ямы	15,1	7,62	50,5	8,9	12,2	21,3
Центр	15,3	9,74	63,7	6,5	14,7	21,8
У ямы	14,6	10,40	71,1	7,3	11,5	22,6

Турбированное строение корнеобитаемого слоя микроповышения обеспечило достоверное ($p < 0,05$) снижение плотности твердой фазы (2,04-2,05 г/см³) по сравнению с пасекой (2,19 г/см³), что связано с примешиванием в толщу различных горизонтов нативной почвы, включая органогенный горизонт (лесная подстилка).

Как правило, общая пористость в пасеках и микроповышениях ниже оптимальных значений для роста растений (>50 %), установленных для пахотных

горизонтов почв (Шеин, 2005). Это наблюдалось нами на микроповышениях и в других условиях произрастания (Ильинцев и др., 2024). Снижению общей скважности способствует вынос нижних почвенных горизонтов и прижим микроповышения ковшом экскаватора. Статистические расчеты показали, что достоверные отличия по общей пористости в турбированном слое в разных местах микроповышения отсутствуют ($p > 0,05$).

Параметры пористости аэрации в микроповышении несколько выше, чем на нетронутой обработкой почве. Однако и в том, и в другом случае в летнее время они находятся на достаточной критическом уровне и не различаются по местам локализации в пределах микроповышения ($p > 0,05$). Нижним пределом пористости аэрации считается 15%, при котором отмечается снижение роста корней растений (Page-Dumroese et al., 1998).

Выводы

В результате, различия в строении турбированного экскаватором корнеобитаемого слоя почвы в создаваемых микроповышениях, прежде всего показывают изменения, связанные с плотностью почвы, с ее вещественным (соотношение минеральной и органической части) и гранулометрическим составом. Отражается это в показателе плотности твердой фазы почвы и ее способности удерживать влагу (полевая влажность), что будет обеспечивать растворимость и поступления в растения питательных веществ. Дальнейшие исследования необходимо направить на изучение строения (переслоенности) микроповышений и их влияния на рост растений.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>.

Литература

- Бартенев И.М. (2013) К вопросу создания лесных культур посадкой ПЗМК. *Лесотехнический журнал* **2**, 123–130.
- Желдак В.И., Кулагин А.А., Дорощенко Э.В., Липкина Т.В. (2020) Концептуальные вопросы совершенствования лесоводственной системы леса и ее использования *Экобиотех* **3(3)**, 457–471.
- Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Богданов А.П., Парамонов А.А. (2024) Опыт создания лесных культур на микроповышениях при экскаваторной обработке почвы. *Лесной Вестник-Forestry Bulletin* **28(2)**, 5-16. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2024-2-5-16>

- Касимов А.К., Итешина Н.М., Моличева Т.О. (2009) Агрехимические свойства лесопосадочных мест в условиях механической обработки почвы на еловых вырубках Удмуртской Республики. *Аграрный вестник Урала* **5(59)**, 89–91.
- Мерзленко М.Д. (2017) Актуальные аспекты искусственного лесовосстановления. *ИВУЗ. «Лесной журнал»* **3**, 22–30. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.22>
- Мочалов Б.А., Бобушкина С.В. (2021) Лесокультурное производство – основа непрерывности лесопользования. *Изв. вузов. Лесн. журн.* **4**, 80–96. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-80-96>
- Распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 N 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 год» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377162 (дата обращения 01.02.2024).
- Сахнов В.В., Прокопьев А.П., Галиуллин И.Р., Глушко С.Г. (2023) Рост и развитие лесных культур сосны обыкновенной, созданных посадочным материалом с закрытой и открытой корневой системой, в различных условиях Республики Татарстан. *Лесной вестник / Forestry Bulletin* **27(2)**, 38–48. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-2-38-48>
- Скляр Г.А., Шарова А.С. (1970). Почвы лесов Европейского Севера. М.: Наука, 268 с.
- Суворов В.И. (1972) Влияние условий корневого питания на морфологию, анатомию, физиологию и рост саженцев сосны и ели в лесных культурах на вырубках южнотаежной подзоны. *Леса Урала и хозяйство в них*: сб. науч. тр. Свердловск. Вып. **6**, 162–174.
- Шейн Е.В. (2005). Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 432 с.
- Nzokou P., Cregg B.M. (2010) Morphology and foliar chemistry of containerized *Abies fraseri* (Pursh) Poir. seedlings as affected by water availability and nutrition. *Annals of Forest Science* **67**, 602, 1–9. <https://doi.org/10.1051/forest/2010015>
- Puettmann K.J., Ammer C. (2007) Trends in North American and European regeneration research under the ecosystem management paradigm. *European Journal of Forest Research* **126(1)**, 1–9.
- Page-Dumroese D.S., Harvey A.E., Jurgensen M.F., Amaranthus M.P. (1998) Impacts of soil compaction and tree stump removal on soil properties and outplanted seedlings in northern Idaho, USA. *Canadian Journal of Forest Research* **78**, 29–34. <https://doi.org/10.4141/S97-022>

УДК 574.4

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА С ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ НА КАРБОНОВОМ ПОЛИГОНЕ «ЧАШНИКОВО»

Ильичев И.А.¹, Ольчев А.В.², Романенков В.А.¹, Покровская А.И.², Сорокин А.С.¹, Чекин М.Р.¹, Решетникова Р.А.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
geoset@yandex.ru

² Географический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация
aoltche@yandex.ru

SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF SOIL CARBON DIOXIDE EMISSIONS AT THE
«CHASHNIKOVO» CARBON SUPERSITE

Ilichev I.A.¹, Olchev A.V.², Romanenkov V.A.¹, Pokrovskaya A.I.², Sorokin A.S.¹, Chekin M.R.¹,
Reshetnikova R.A.¹

¹ Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: Regular measurements of CO₂ fluxes from the soil surface at the selected experimental sites showed significant spatial and temporal variability determined by temperature and moisture conditions, soil type and vegetation cover structure. Maximum values of CO₂ emission were observed in the dry meadow during summer months, while the rate of CO₂ emission from the black fallow surface was more than two times lower than the soil respiration of the agricultural and meadow plots. In winter months the differences in soil respiration rates were minimal.

Введение

Сбор репрезентативных данных о потоках парниковых газов в природных экосистемах является ключевой задачей для получения достоверных и международно признаваемых научных данных для оценки антропогенных и природных потоков климатически активных веществ на территории Российской Федерации. По оценкам международной группы экспертов именно парниковые газы играют ключевую роль в современных климатических изменениях (IPCC 2022). На решение данной задачи в России направлены два крупных проекта: пилотный проект Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по карбоновым полигонам и Важнейший инновационный проект государственного значения (ВИП ГЗ) по созданию в России единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ, в том числе и парниковых газов, курируемый Министерством экономического развития Российской Федерации. Московский университет имени М.В.Ломоносова является активным участником обоих проектов, реализуя

исследования на базе Учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ «Чашниково» в Московской области.

Целью данного исследования является оценка сезонной и пространственной изменчивости эмиссии диоксида углерода (CO_2) на экспериментальных участках карбонового полигона «Чашниково» и оценке их чувствительности к изменению температуры и влажности исследуемых почв.

Объекты и методы

Территория карбонового полигона «Чашниково» располагается в пределах верхнего течения р. Клязьма на северо-западе Московской области, в 43 км от г. Москвы и в 8 км от Зеленограда. Район исследования расположен в пределах Средне-Русской возвышенности и преимущественно занимает южный склон Клиньско-Дмитровской гряды с абсолютными высотами 250–320 м. Чашниковская впадина с долиной р. Клязьмы расположена между Льяловской и Алабушевской грядами. Структура поверхности характеризуется мягкими очертаниями водоразделов и пологих склонов (Абрукова и др., 1986). Климат района умеренно-континентальный умеренного климатического пояса со средними температурами холодного месяца $-10,5^\circ\text{C}$. и самого теплого месяца $+17^\circ\text{C}$. Среднегодовая температура составляет $+3,7^\circ\text{C}$. Годовое количество осадков составляет 700–750 мм, 70% из которых приходится на теплое время года. Снежный покров сохраняется в период с середины ноября до середины апреля. Почва может промерзнуть на глубину 40–100 см (Стома и др., 2017).

Исследуемая территория относится к зоне распространения покровных суглинков, подстилаемых мореной. На водоразделах и террасах на распаханых землях распространены агродерновоподзолистые почвы (Классификация..., 2004), на зарастающих пашнях – агродерновоподзолистые реградированные (Богатырев и др., 2021). Под ненарушенными лесами автоморфных ландшафтов развиты дерново-подзолистые почвы.

В период с февраля по октябрь 2023 года на территории карбонового полигона «Чашниково» 2 раза в месяц проводились измерения потоков CO_2 с поверхности почв в природных и антропогенно-преобразованных экосистемах. Исследования проводились на 6-ти мониторинговых площадках (Рис. 1), расположенных в типичных природных биогеоценозах южной тайги и агроландшафтах:

1. Во вторичном елово-осиновом щитовниково-медунично-звездчатковом лесу. Почва среднедерново-неглубокоподзолистая поверхностно-слабоглееватая языковатая среднесуглинистая (Epygleyic Glossic Retisol (Loamic));
2. На многолетних злаковых травах 2-го года использования. Почва дерново-мелкоподзолистая освоенная языковатая мелкопахотная среднесуглинистая слабосмытая (Glossic Antric Retisol (Loamic));

3. Во вторичном папоротниково-снытиево-кисличном ельнике. Почва глубоководново-глубокоподзолистая легкосуглинистая (Retisol (Loamic));
4. На суходольном тимофеевко-таволговом разнотравном лугу. Почва глубоководново-глубокоподзолистая поверхностно-оглеенная среднесуглинистая (Erygleyic Retisol (Loamic));
5. В переувлажненном ельнике. Почва торфяная болотно-низинная типичная торфяно-глеевая (Eutric Histosol);
6. На черном паре. Почва дерново-неглубокоподзолистая освоенная языковатая среднепахотная легкосуглинистая (Glossic Antric Retisol (Loamic)).

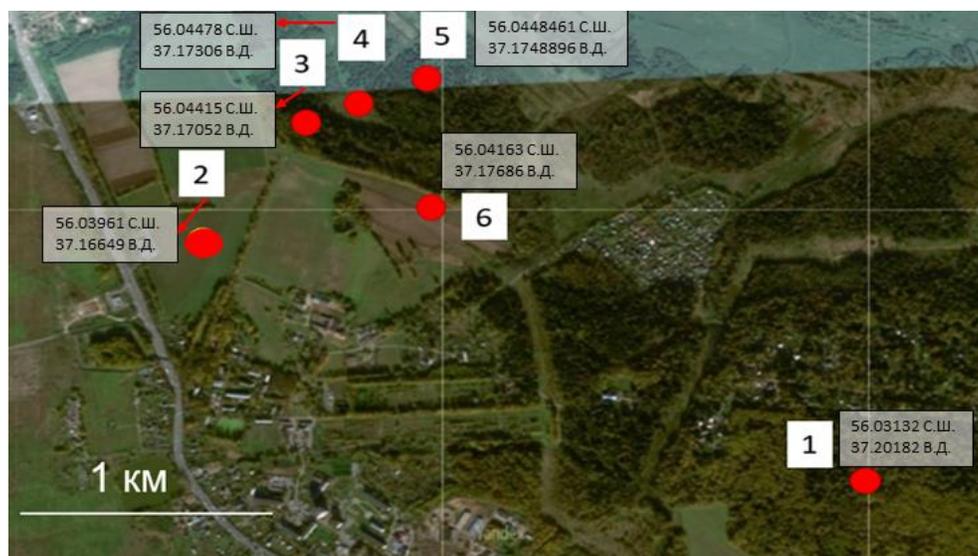


Рис.1. Схема расположения мониторинговых площадок на территории карбонового полигона «Чашниково». Красный круг – центриод площадки.

В исследуемых почвах были рассчитаны запасы органического углерода в верхнем 30-ти сантиметровом слое из смешанных почвенных образцов мониторинговых площадок. Почвы лесных экосистем характеризовались наименьшими запасами органического углерода: 36,7 т/га – в ельнике папоротниково-снытиево-кисличном и 40,0 т/га – в елово-осиновом щитовниково-медунично-звездчатковом лесу. В почвах травянистых экосистем запасы органического углерода превышали показатели лесных участков: 52,6 т/га – на суходольном разнотравном лугу и 57,3 т/га – в агропочвах под многолетними травами. Максимальные запасы почвенного органического углерода среди площадок мониторинга наблюдались в агропочвах, находившихся под паром, - 61,9 т/га.

Измерения потоков CO_2 проводились камерным методом с использованием автоматической измерительной камеры и мобильного газоанализатора LICA PS-9000 (Beijing LICA United Technology Limited, China). В рамках данной методики поток рассчитывается из изменений концентраций CO_2 в замкнутом объеме за определенное время. Камера прибора располагается на поверхности почвы, очищенной от растительности или на поверхности снежного покрова в зимний период (Рис. 2). Длительность каждого измерения составляла 60 секунд. Параллельно с измерениями потоков CO_2 определялась температура и влажность почвы логгером LI-520В (Beijing LICA United Technology Limited, China). На каждой площадке измерения проводились в 8-ми кратной повторности.



Рис. 2. Размещение измерительной камеры газоанализатора LICA PS-9000 на поверхности почвы и снежного покрова

Результаты и обсуждение

Результаты измерений эмиссии CO_2 с поверхности почвы показали значительную временную и пространственную изменчивость потоков (Рис. 3). Минимум почвенной эмиссии CO_2 наблюдался в зимний период (февраль) около 1.24 ± 1.52 мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^2\text{с}$, и увеличивался в летние месяцы (август) в среднем до 7.69 ± 2.48 мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^2\text{с}$. Выделение CO_2 из почвы в атмосферу в осенние месяцы было в среднем в 3 раза ниже, а зимой – почти в 10 раз ниже, чем в летние месяцы. Максимальные значения эмиссии CO_2 в летние месяцы отмечались на суходольном тимофеевко-таволговом разнотравном лугу (точка 4) в июне и июле, а также многолетних злаковых травах 2-го года использования (точка 2). Данная закономерность, очевидно, обусловлена интенсивным прогревом

экспериментальных площадок в летние месяцы, обеспечившим высокие скорости разложения органического материала почвы в условиях достаточного почвенного увлажнения. Существенный вклад в суммарное почвенное дыхание вносило и автотрофное корневое дыхание травянистой растительности. Сравнивая почвенное дыхание площадок, покрытых травянистой растительностью (точки 2 и 4), с паром (точка 6) можно видеть, что скорость эмиссии CO_2 с поверхности черного пара в летние месяцы была более чем в 2 раза ниже полевых и луговых участков, не превышая в июле $4.4 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$.

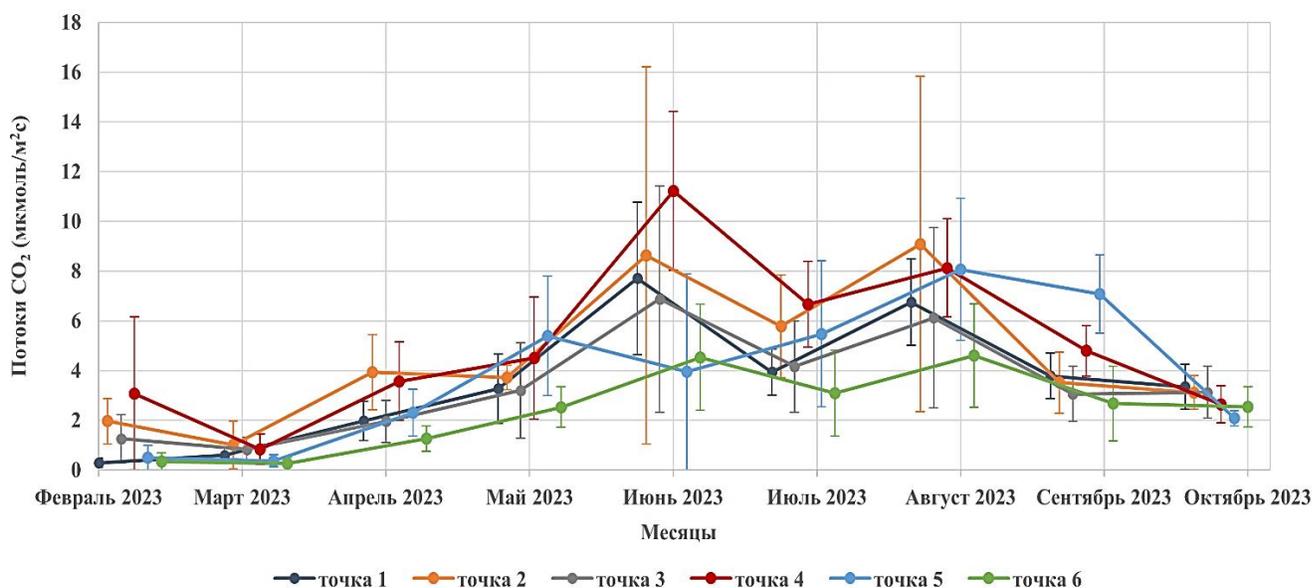


Рис. 3. Сезонная изменчивость эмиссии CO_2 с поверхности почвы на мониторинговых площадках карбонового полигона «Чашниково»

Поступление CO_2 из почвы в атмосферу статистически значимо зависело от изменения температуры и объемной влажности почвы (Рис. 4-5). Положительные значения потока CO_2 отмечаются во всем диапазоне температур, включая зимние периоды со снежным покровом и отрицательными почвенными температурами. Во всем диапазоне температур от -2 до 32°C для всех экспериментальных площадок отмечается устойчивое увеличение эмиссии CO_2 с поверхности почвы (Рис. 4). Наблюдаемая дисперсия может быть следствием как различий во влажности почвы, так и пространственной неоднородности почвенных характеристик и растительности, обеспечивших различия в скорости автотрофного и гетеротрофного дыхания на выбранных экспериментальных площадках.

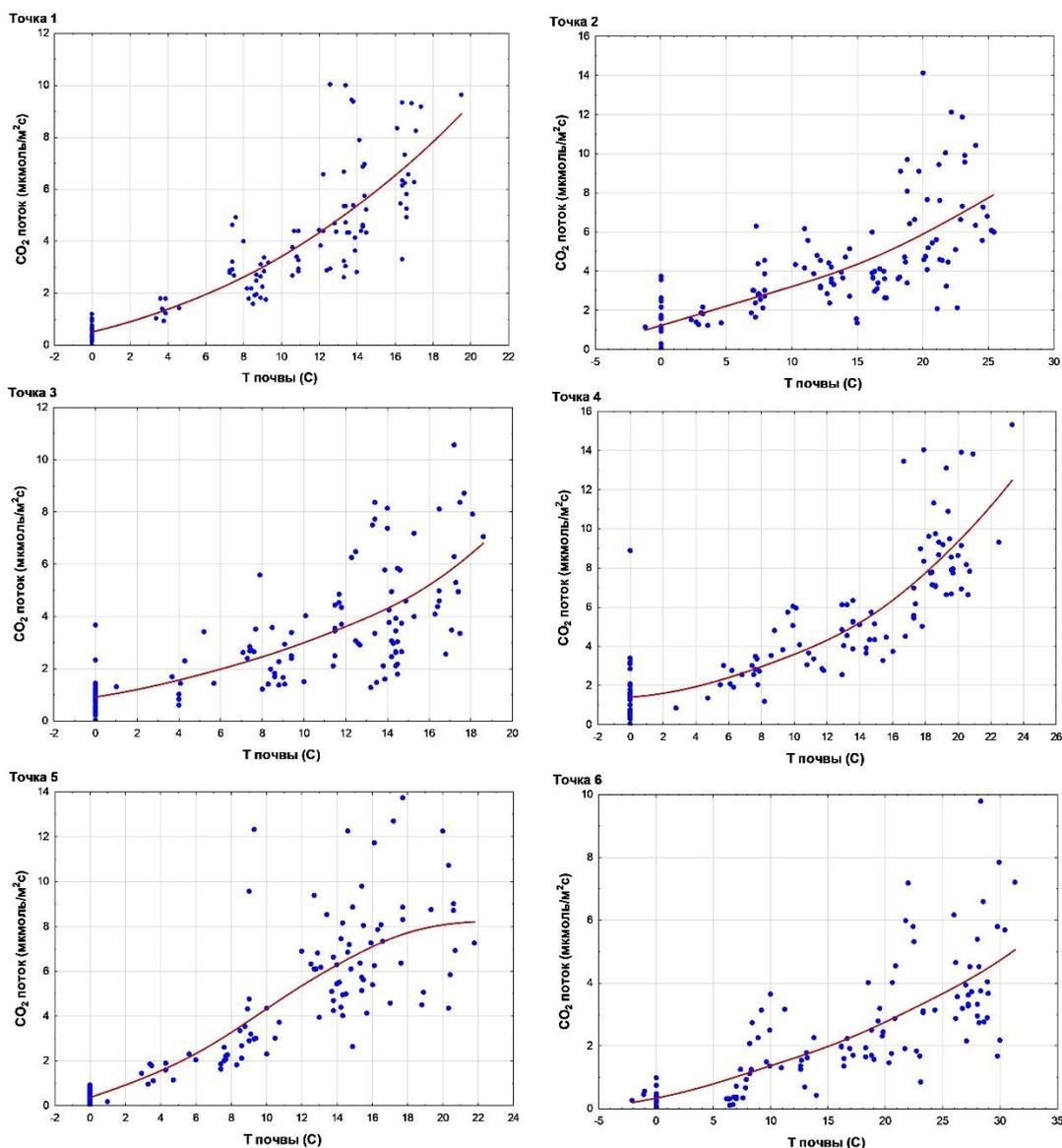


Рис. 4. Зависимость эмиссии CO₂ с поверхности почвы от температуры почвы. Сплошная красная линия является аппроксимацией зависимости эмиссии CO₂ с поверхности почвы от температуры почвы, полученной методом наименьших квадратов.

Анализ зависимости эмиссии CO₂ с поверхности почвы от влажности верхнего почвенного слоя показал их значительное разнообразие, определяемое ландшафтными особенностями, типом землепользования и почвенными характеристиками выбранных участков (Рис. 5). Выявленная значительная изменчивость почвенного дыхания на одних и тех же участках при близких значениях влажности обусловлено, прежде всего, существенным влиянием температуры почвы на интенсивность почвенного дыхания. Определенное влияние

на высокую изменчивость могла оказать и пространственная неоднородность почвенного покрова в пределах выбранных участков. В целом данные измерений показывают небольшой рост эмиссии CO_2 при увеличении влажности в диапазоне до 15-20% и ее снижение при дальнейшем росте влажности (более 20%). Полученные зависимости в целом хорошо согласуются с имеющимися литературными данными (Kivalov et al, 2023; Молчанов и др., 2017; Zhang et al, 2015; Schaufler et al, 2010; Peterjohn et al, 1994).

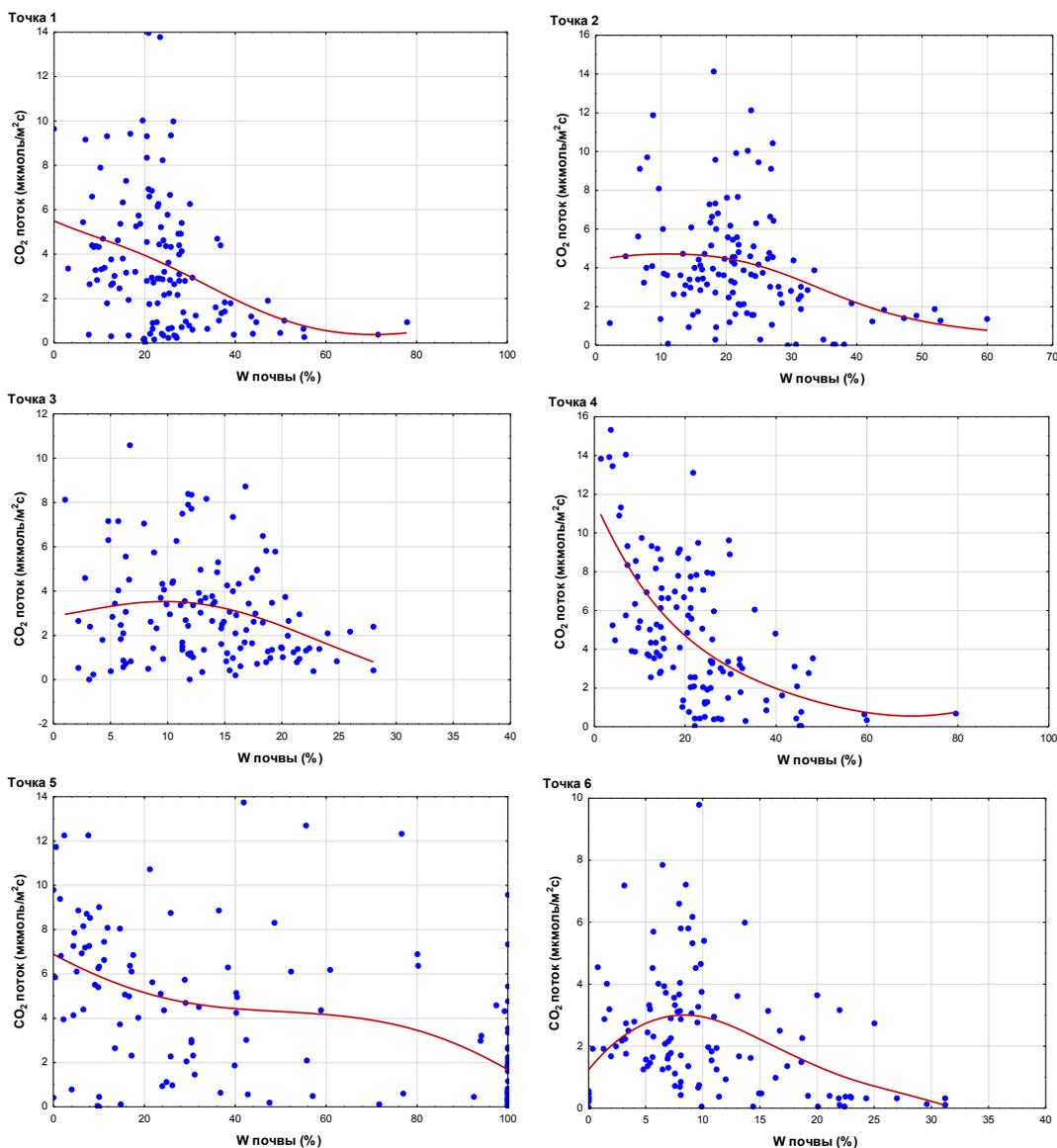


Рис. 5. Зависимость эмиссии CO_2 с поверхности почвы от влажности почвы. Сплошная красная линия является аппроксимацией зависимости эмиссии CO_2 с поверхности почвы от влажности почвы, полученной методом наименьших квадратов.

Выводы

Регулярные измерения потоков CO_2 с поверхности почв мониторинговых площадок на карбоновом полигоне «Чашниково» в Московской области, проведенных с использованием камерного метода, показали значительную пространственную и временную изменчивость, определяемую температурными и влажностными условиями, типом почв и структурой растительного покрова. Максимальные значения эмиссии CO_2 отмечались на суходольном разнотравном лугу в летние месяцы, тогда как скорость эмиссии CO_2 с поверхности черного пара была более чем в 2 раза ниже почвенного дыхания полевых и луговых участков. В зимние месяцы различия в скорости почвенного дыхания были минимальными. Скорость почвенной эмиссии увеличивалась с ростом температуры верхнего почвенного горизонта во всем диапазоне наблюдаемых температур от -2 до 32°C . Увеличение почвенной влажности вело, с одной стороны, к незначительному увеличению почвенного дыхания при низкой почвенной влажности, а с другой стороны, к ее уменьшению при увеличении почвенной влажности более 15-20%. Полученные результаты имеют важное значение для создания базы экспериментальных данных для оценки вклада природных и антропогенно-измененных экосистем, а также разных типов почв в формирование баланса парниковых газов в атмосфере.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6), а также при поддержке Программы развития МГУ (проект № 23-Ш07-55).

Литература

- Абрукова, В. В., Акульшина, Е. А., Афанасьева, Т. В., Белан, В. С. (1986). Почвенно-агрономическая характеристика АБС Чашниково. М.: Изд-во Моск. ун-та.
- Богатырев, Л. Г., Бенедиктова, А. И., Карпухин, М., Телеснина, В. М., Жилин, Н., Вартанов, А. Н., Земсков, Ф.И., Демин, В. В. (2021). Водорастворимые компоненты почв гетеролитных сопряженных ландшафтов южнотаежной подзоны. *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*, (1), 3-13.
- Классификация почв России (2004). Смоленск: Ойкумена, 342 с.

- Молчанов, А. Г., Курбатова, Ю. А., Ольчев, А. В. (2017). Влияние сплошной вырубki леса на эмиссию CO₂ с поверхности почвы. *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*, **(2)**, 190-196.
- Стома, Г. В., Богатырев, Л. Г., Макаров, М. И., Манахов, Д. В. (2017). Летняя практика по почвоведению: Учебно-методическое пособие для студентов 1 курса факультета почвоведения МГУ. М.: МАКС Пресс. 156 с.
- IPCC: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Oke, A., and Rama, B., Cambridge University Press
- Kivalov, S., Lopes de Gerenyu, V., Khoroshaev, D., Myakshina, T., Sapronov, D., Ivashchenko, K., Kurganova, I. (2023). Soil Temperature, Organic-Carbon Storage, and Water-Holding Ability Should Be Accounted for the Empirical Soil Respiration Model Selection in Two Forest Ecosystems. *Forests*, **14(8)**, 1568.
- Peterjohn, W. T., Melillo, J. M., Steudler, P. A., Newkirk, K. M., Bowles, F. P., Aber, J. D. (1994). Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures. *Ecological applications*, **4(3)**, 617-625.
- Schaufler, G., Kitzler, B., Schindlbacher, A., Skiba, U., Sutton, M. A., Zechmeister-Boltenstern, S. (2010). Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. *European Journal of Soil Science*, **61(5)**, 683-696.
- Zhang, Q., Katul, G. G., Oren, R., Daly, E., Manzoni, S., & Yang, D. (2015). The hysteresis response of soil CO₂ concentration and soil respiration to soil temperature. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **120(8)**, 1605-1618.

УДК 631.433.3

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА ЭМИССИЮ CO₂ ИЗ ПОЧВ ПОД ХВОЙНЫМИ И ЛИСТВЕННЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ БОТАНИЧЕСКОГО САДА МГУ

Исаева А.В.^{1,2}, Гончарова О.Ю.¹, Рыжова И.М.¹

¹Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
goncholgaj@gmail.com, iryzhova@mail.ru

²Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва,
Российская Федерация
isaevaany@yandex.ru

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ON THE CO₂ FLUX FROM SOILS UNDER
DECIDUOUS AND CONIFEROUS PLANTATIONS OF THE LMSU BOTANICAL GARDEN

Isaeva A.V.^{1,2}, Goncharova O.Yu.¹, Ryzhova I.M.¹

¹Soil Science Faculty LMSU, Moscow, Russian Federation
goncholgaj@gmail.com, iryzhova@mail.ru

²Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russian Federation
isaevaany@yandex.ru

Annotation: The long-term study results of the soil gas function in the LMSU Botanical Garden are discussed. CO₂ emissions, hydrothermal parameters of the soils under deciduous and coniferous plantations were measured year-round. Received data allowed to estimate, in a first approximation, the influence of soil hydrothermal parameters on the CO₂ flux.

Введение

За последние годы, по информации, представленной в резюме для политиков от 2021 года (IPCC, 2021), опубликованного в рамках шестого оценочного цикла МГЭИК, наблюдается рост концентраций парниковых газов в воздухе атмосферы, и к 2019 году содержание CO₂ достигло величин равных 410 ppm. Почвенный покров обеспечивает наибольший поток диоксида углерода, а также выполняет функцию его поглотителя. Однако к настоящему моменту региональные и глобальные количественные оценки эмиссии CO₂ из почв, обусловленной совокупностью абиотических процессов, гетеротрофным и корневым дыханием, обладают наибольшей неопределенностью (Kurganova et al., 2022). Для уточнения этих значений большое значение имеют долгосрочные круглогодичные исследования газовой функции почв, позволяющие уловить ее отклик на меняющиеся условия окружающей среды в результате климатических изменений. При оценке и прогнозе эмиссии углекислого газа с поверхности почв необходимо учитывать ее зависимость от гидротермических параметров почвы. Зачастую только температура учитывается как наиболее значимый фактор при проведении оценок потока углекислого газа

(Mukhortova et al., 2021). Так как действие факторов не аддитивно, перед исследователями встает вопрос о влиянии взаимодействия температуры и влажности почв на эмиссию CO₂. Кроме того, следует отметить, что влияние одного фактора сложно отделить от другого при проведении полевых исследований.

Еще одним немаловажным аспектом оценки потоков CO₂ из почв является учет совокупного действия разных процессов: гетеротрофного дыхания микроорганизмов, автотрофного дыхания корней, внутрипочвенных межфазных взаимодействий, которое имеет сложный характер и воздействуют на результирующий поток и на процессы газогенерации. Одним из эффективных методов изучения потоков CO₂ из почв является математическое моделирование, позволяющие получить их оценку при изменениях условий среды. В зависимости от поставленных задач полезными могут оказаться, как эмпирические, так и биогеохимические динамические модели (Blagodatsky and Smith, 2012).

Целью данного исследования являлся первичный количественный анализ зависимости эмиссии CO₂ от гидротермических параметров исследуемых почв для последующей разработки и проверки эмпирических и процесс-ориентированных моделей.

Объекты и методы

Объекты

Мониторинговые наблюдения проводились на урбиквазиземах (КиДПР, 2004) двух ключевых участков, расположенных в дендрарии Ботанического сада МГУ им. М.В. Ломоносова на Воробьевых горах под хвойными и лиственными насаждениями (55.708106° с.ш., 37.526082° в.д.).

Климат территории Ботанического сада МГУ на Воробьевых горах влажный умеренно континентальный с четко выраженной сезонностью. Среднемесячные температуры января в г. Москва составляют -7 - -5 °С и июля - +16 - +18 °С. В течение года суммарная величина осадков составляет 600-800 мм, 30 - 40% из которых приходится на период с ноября по март. Зима в городе умеренно холодная со сравнительно устойчивым снежным покровом, наблюдается теплое, сравнительно влажное лето. По данным Гидрометцентра России и Справочника эколого-климатических характеристик Москвы (2005) можно отметить, что в последние десятилетия в Москве наблюдается тенденция к повышению среднемесячных и среднегодовых температур воздуха, а также уменьшение периода устойчивого снежного покрова и отрицательных температур. Это может быть связано с глобальными климатическими изменениями, а также с увеличивающимся влиянием техногенного фактора на климат города (Москва: Геология и город, 1997).

Естественные почвообразующие породы на территории Ботанического сада МГУ на Воробьевых горах представлены слабоводопроницаемыми покровными пылеватými глинами и суглинками, залегающими на морене (Раппопорт, 2004;

Гончарова и др., 2016). Согласно архивным данным, основные работы по планировке территории будущего Ботанического сада и по рекультивации плодородного почвенного горизонта проводили в 1950—1951 гг. (Гончарова и др., 2016; Розанова, 2016). Нарушения почвенного покрова, полученные в ходе строительства главного здания МГУ, были нивелированы, после чего была реализована рекультивация почвенного покрова путем внесения низинного торфа, при этом на некоторых участках территории торф был перемешан с верхней частью грунта. Затем, после заложения сада, первые 10-20 лет его существования сотрудниками производилось внесение низинного торфа и минеральных удобрений в целях повышения плодородия почвы, после чего около 15 лет удобрения вносились только в приствольные круги. В последующие годы удобрения на территории не применялись (Раппопорт, 2004), а почвообразующие отложения не испытывали серьезной антропогенной нагрузки (Гончарова и др., 2016).

На ключевом участке под лиственными насаждениями древесный ярус представлен грабом обыкновенным (*Carpinus betulus* L.). Для второго ключевого участка главным видом древесного яруса является ель сибирская (*Picea obovate* L.). В подросте грабняка и ельника произрастают клен остролистный (*Acer platanoides* L.) и рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.). В травянистом покрове насаждений граба можно выделить купену душистую (*Poligonatum odoratum* Mill.). В подлеске ельника преобладают жимолость обыкновенная (*Lonicera xylosteum* L.) и смородина обыкновенная (*Ribesia vulgare* Lam.). Для ключевого участка под насаждениями ели характерно наличие сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria* L.), недотроги обыкновенной (*Impatiens nolitangere* L.) и чистотела большого (*Chelidonium majus* L.) в напочвенном покрове (Гончарова и др., 2016). Проективное покрытие почвы под грабом обыкновенным составляет 30-35%, почвы под елью сибирской — 65-70%.

В почвенном профиле под еловыми насаждениями хорошо выражен гумусово-аккумулятивный горизонт комковатой структуры мощностью 10 см. Ниже, до глубины 20 см, залегает переходный гумусовый горизонт. Следует отметить преобладание в окраске нижних почвенных горизонтов буровато-палевых оттенков. Для исследуемой почвы характерна значительная уплотненность почвы по всему профилю, за исключением верхнего органогенного горизонта. По копролитам и ходам червей была диагностирована высокая биогенность до глубины 80 см, во всех горизонтах были обнаружены и описаны антропоморфы, литоморфы, включения карбонатов и углистые частицы. Следует отметить, что вскипание было отмечено локальное, только для преобладающих в почве карбонатных включений (Гончарова и др., 2016). В почве под насаждениями граба можно выделить мощную (до 3 см) подстилку. Мощность верхнего минерального горизонта составляет 18 см. Горизонт имеет однородную окраску, темно-серого цвета, с комковато-порошистой структурой. Для нижней части профиля характерны серо-бурые оттенки в окраске, исследователи отмечают уплотненность почвенного материала. Переходный

горизонт, расположенный с 18 до 34 см, неоднороден по цвету, обладает серо-бурой окраской и глыбистой структурой. Нижний минеральный горизонт так же неоднороден по цвету, по граням структурных отдельностей встречаются следы оглеения. Как и для почвы под еловыми насаждениями, в почве под насаждениями граба были обнаружены антропогенные включения по всему профилю, и описано бурное вскипание включений карбонатов в верхнем горизонте (Удовенко, 2018).

Для обеих почв характерно увеличение плотности с ростом глубины. При этом, несмотря на небольшую отдаленность ключевых экспериментальных участков, можно отметить следующие различия объемной массы. Так, поверхностный горизонт почвы под грабняком обладает более высокими значениями плотности, чем верхний горизонт почвы под ельником: $0,9 \text{ г/см}^3$ и $0,8 \text{ г/см}^3$ соответственно. Для минеральных горизонтов исследуемых почв характерно обратное отношение объемных масс, а именно: под еловым фитоценозом нижние минеральные горизонты почвы характеризуются более высокой плотностью, достигающей $1,4 \text{ г/см}^3$, чем под грабовым, где плотность соответствующих горизонтов составляет $1,2 \text{ г/см}^3$ (Удовенко, 2018). Для почвы под хвойными насаждениями характерны более низкие абсолютные значения рН среды, чем для почвы под лиственными насаждениями, что, вероятно, связано с подкислением почвы продуктами разложения елового опада. В целом, в обеих почвах наблюдается тенденция к увеличению рН с увеличением глубины. Почвы под еловыми и грабовыми насаждениями обладают сопоставимыми величинами запасов углерода, $24,1 \text{ кг/м}^2$ и $20,42 \text{ кг/м}^2$ соответственно (Исаева, 2022).

Методы

В рамках мониторинга газовой функции урбиквазиземов двух ключевых участков раз в 2 недели осуществлялось измерение эмиссии CO_2 с поверхности почвы методом закрытых камер в трехкратной повторности (Смагин, 2005; 2015; Riveros-Iregui, 2008) в течение 5 лет, а именно с ноября 2016 года по ноябрь 2021 года. Перед началом эксперимента на экспериментальных площадках были установлены специальные стационарные пластиковые основания под камеры, в которых была удалена надземная растительность в целях нивелирования вклада дыхания растительности в измеряемую эмиссию CO_2 с поверхности почв. Для измерений использовались камеры, представляющие собой железные цилиндры с диаметром 10 см и высотой 15 см. В верхней части камер предусмотрено отверстие для отбора проб воздуха, герметично закрытое резиновой пробкой. Измерения проводились в период с 12 до 16 часов дня, так как, согласно работе Удовенко (2018), в это время суток на исследуемых объектах достигается средний по величине поток CO_2 из исследуемых почв за сутки. При проведении непосредственных измерений, камеры устанавливались в основания, затем, при положительных температурах воздуха в основание заливался раствор соли с целью создания гидрозатвора,

препятствующего утечке углекислого газа из камеры. Отбор проб воздуха проводился дважды: сразу после установки камер и по истечении времени экспозиции, которое составляло в летний период 10 минут, в осенний и весенний период 15 минут и в зимний – 20 минут.

Во время исследований осуществлялся контроль температуры воздуха, а также проводилось погоризонтное измерение температуры почвы с помощью датчиков-логгеров Thermochron iButton TM (Dallas Semiconductor Corporation, TX, USA; разрешение 0.5°C, точность ±1°C) и погоризонтное определение объемной влажности с помощью датчиков-логгеров Spectrum WatchDog 1000 Series Micro Stations - Temp/RH раз в час круглогодично. Для дополнительного контроля объемной влажности проводились измерения показателя с поверхностного горизонта с помощью влагомера FieldScout TDR 100 Soil. Следует отметить, что погоризонтное определение объемной влажности для обеих почв проводилось до глубины 20-40 см. Для более глубоких горизонтов была проведена экстраполяция значений влажности с учетом данных, полученных в результате измерений, и закономерностей изменения показателя, наблюдавшихся в верхних горизонтах.

Перевод полученных в полевых условиях данных эмиссии в необходимые единицы измерения осуществлялся по следующей формуле (Глаголев и др., 2010; Гончарова и др., 2012):

$$F \left(\frac{\text{мгСО}_2}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \right) = \frac{\Delta C * P * M * h}{100 * R * T * \Delta t} = \frac{3,18 * \Delta C * P * h}{(273 + t^\circ) * \Delta t}$$

где P – атмосферное давление, кПа

t° - температура в градусах Цельсия,

h - высота камеры от поверхности почвы, см

ΔC – изменение концентрации газа в камере,

Δt - время экспозиции,

3.18 - коэффициент, учитывающий числовые значения входящих в формулу констант R, M и соотношения размерностей (Па/кПа, час/мин, м/см, мг/г, %/ppm).

Расчет коэффициента температурной чувствительности Q₁₀, характеризующего отклик потока CO₂ из почв при увеличении температуры на 10°C, был произведен на основе уравнения экспоненциальной зависимости эмиссии CO₂ от температуры почв по следующей формуле (Матышак и др., 2021; Kirschbaum M.U.F., 2006; Tuomi M. et al., 2008):

$$F(t^\circ) = ae^{bt^\circ}, Q_{10} = e^{10b}$$

где F – величины эмиссии CO₂ для исследуемых почв, мгСО₂/(м²*ч);

t° – величины среднесуточных температур в слое 0–10 см для соответствующих почв, °C;

a > 0 и b > 0 – параметры.

Статистический анализ данных был проведен с помощью программ Excel и Statistica.

Результаты и обсуждение

Сравним полученные в результате мониторинговых наблюдений значения эмиссии углекислого газа и гидротермических параметров исследуемых почв (рис.1).

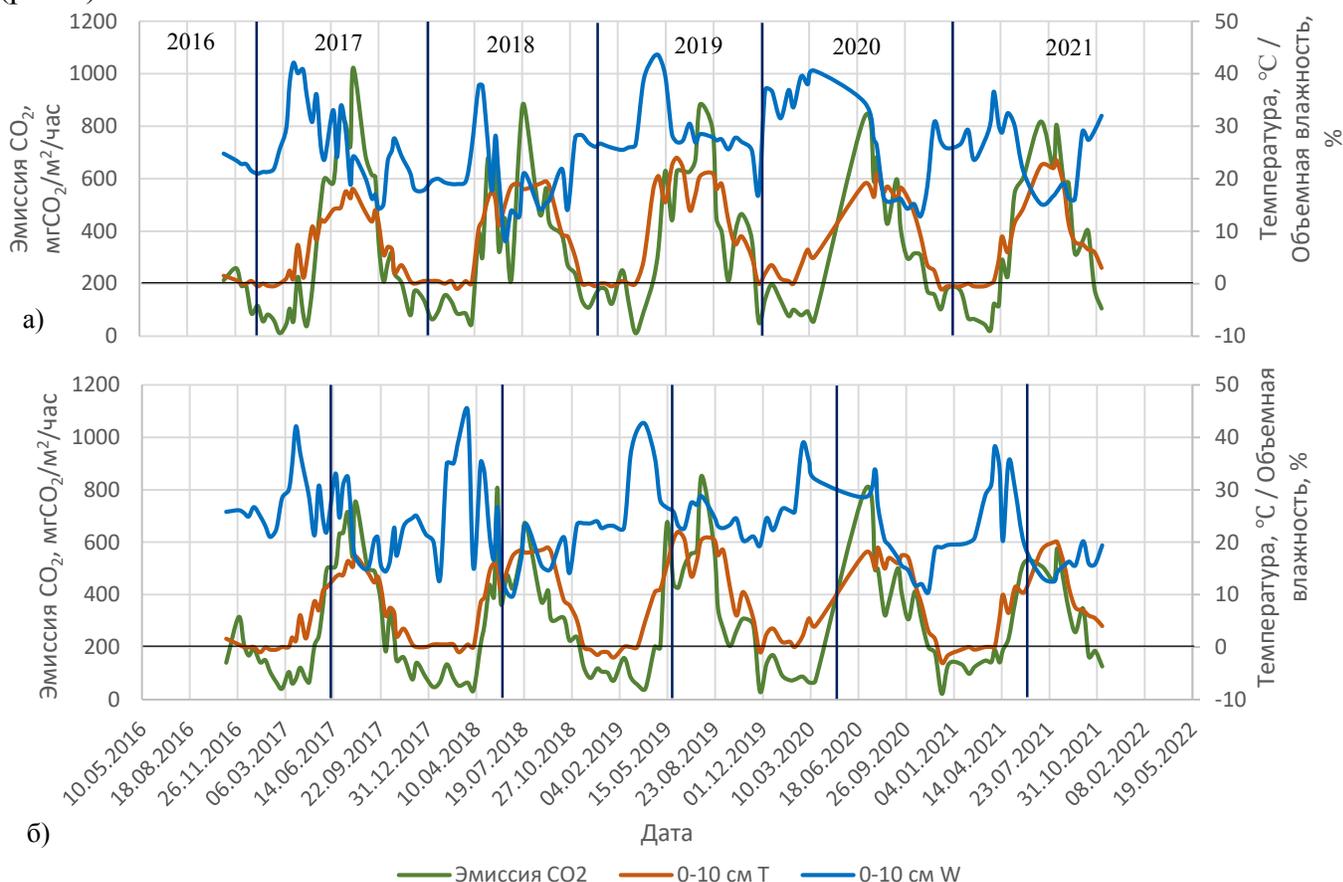


Рис. 1. Динамика эмиссии CO_2 и гидротермических параметров почв под лиственными (а) и хвойными (б) насаждениями дендрария Ботанического сада МГУ за 5 лет (2017-2021).

Можно отметить, что изучаемых объектов вне зависимости от года характерна сезонность динамики потока CO_2 : рост в вегетационный период с дальнейшим снижением осенью и стабилизацией зимой. За период исследования величины потока углекислого газа из почвы под грабовыми насаждениями варьировали в диапазоне от 11 до 1024 $\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{час}$, а под еловыми – от 22 до 854 $\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{час}$, минимальные величины наблюдались в зимний период и период весеннего снеготаяния, максимальные – в период вегетации в летние месяцы.

По данным, зафиксированным установленными на экспериментальных площадках температурными датчиками в почве под грабовыми насаждениями величины температуры варьируют в диапазоне $-1 - 24$ °С, под еловыми – от -3 до 22 °С. Следует отметить, что для почвы под ельником абсолютные значения температур поверхностного горизонта почвы за период наблюдений ниже на $1-2$ °С, чем для почвы под грабом. Вероятно, это связано с большей затененностью поверхности почвы под еловыми насаждениями в летний период и меньшей высотой снежного покрова в зимний, что приводит к меньшему прогреву и большему промерзанию соответственно.

В урбиквазиземах обеих экспериментальных площадок прослеживаются общие черты годовой динамики объемной влажности, в частности, заметно выражена сезонность процессов увлажнения-иссушения. Так, в период наблюдения, годовой пик увлажнения почв вне зависимости от года приходился на весенний период. Это объясняется процессом активного снеготаяния и последующим нисходящим внутрипочвенным током влаги. В летний и осенний периоды можно выделить отдельные периоды увеличения влажности верхних горизонтов, связанные с выпадением большого количества осадков. Зимой влажность почвы постепенно нарастает, что особенно выражено для верхних почвенных горизонтов и связано с процессами таяния снега непосредственно на поверхности почвы, а также подтягиванием влаги к фронту промерзания почвы. Следует отметить, что для почвы под грабняком характерно в целом большее увлажнение, чем для почвы под еловыми насаждениями. Это может быть связано с большей площадью проективного покрытия почвы под ельником, а, следовательно, и большим надземным перераспределением осадков. Также различие корневых систем ели и граба, большая плотность растительности на экспериментальном участке под елью ведут к большему поглощению почвенной влаги растениями на данной площадке по сравнению с площадкой под грабняком. В поверхностном горизонте наблюдается наибольшее временное варьирование абсолютных значений объемной влажности: от $8,2$ до $43,5$ и от $9,8$ до 45% для почв под грабняком и ельником соответственно.

На основе полученных данных была исследована зависимость эмиссии CO_2 от гидротермических показателей. Анализировались общий массив данных за 5 лет (рис.2), а также массивы данных по годам. Полученные результаты свидетельствуют о хорошо выраженной температурной зависимости эмиссии CO_2 , которая может быть описана экспоненциальной моделью. Рассчитанные показатели температурной чувствительности Q_{10} равные $2,67$ и $2,58$ для урбиквазиземов под лиственными и хвойными насаждениями соответственно практически не различаются и соответствуют величине этого показателя для лесных насаждений подзоны хвойно-широколиственных лесов (Kurganova et al., 2022).

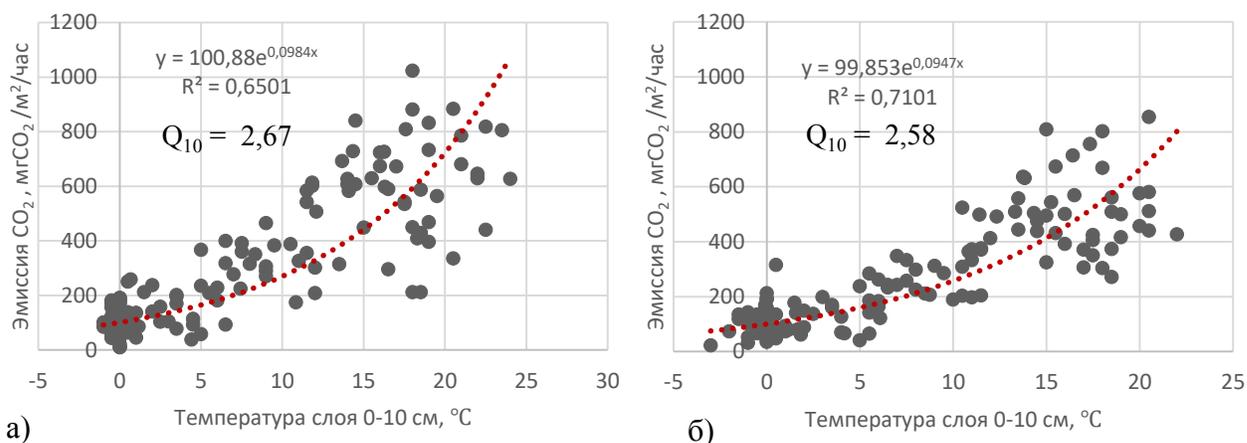


Рис. 2. Зависимость эмиссии CO_2 из почв под лиственными (а) и хвойными (б) насаждениями дендрария Ботанического сада МГУ от температуры слоя 0-10 см на основе анализа массива данных за 5 лет (2017-2021).

В рамках исследования также был проведен анализ зависимости эмиссии углекислого газа от температуры для каждого года наблюдений. Она с разной отчетливостью проявлялась во все годы наблюдений, на что указывает варьирование показателя R^2 , характеризующего качество модели. Он изменялся в диапазоне от 0,41 до 0,87 и от 0,63 до 0,93 для урбиквализемов под грабовыми и еловыми насаждениями соответственно. Наиболее отчетливой температурная зависимость была в 2017 году, а наименее выраженной - в 2019, что вероятно обусловлено большим увлажнением почв в вегетационный сезон этого года. Полученные данные свидетельствуют о лучшей выраженности температурной зависимости для почв под ельником, чем для почв под грабовыми насаждениями.

Проведенный анализ не выявил зависимость потока CO_2 с поверхности почвы от объемной влажности, как для всего массива данных (рис. 3), так и по годам. Вероятно, в условиях опыта она затушевывается влиянием других факторов.

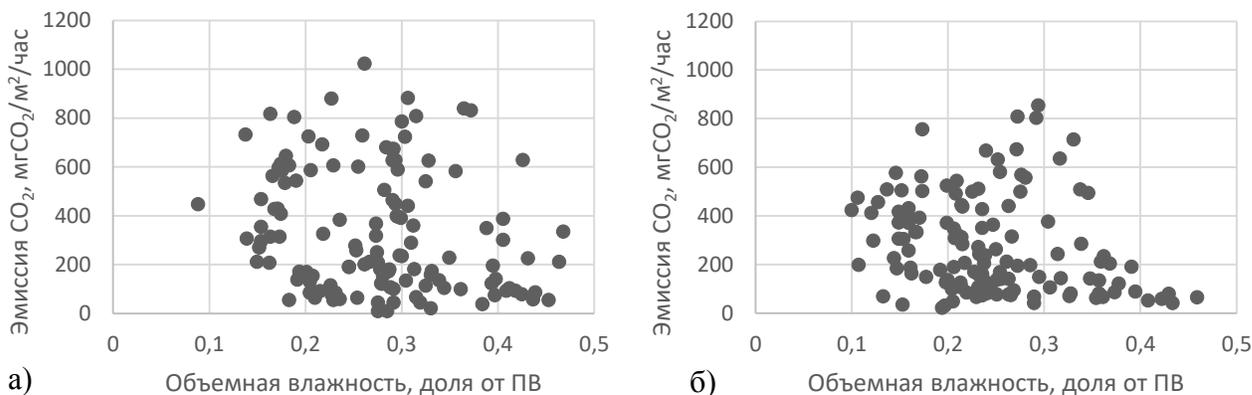
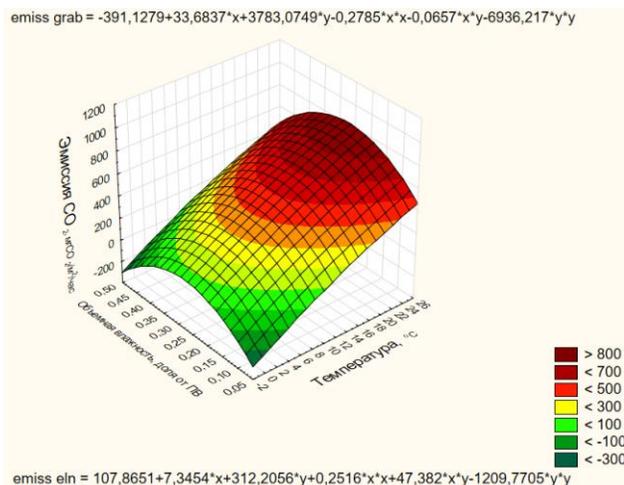


Рис. 3. Зависимость эмиссии CO_2 из почв под лиственными (а) и хвойными (б) насаждениями дендрария Ботанического сада МГУ от W слоя 0-10 см по массиву данных за 5 лет (2017-2021).

Графики, характеризующие зависимость эмиссии CO_2 от взаимодействия гидротермических факторов (рис.4), свидетельствуют о том, что зависимость от влажности имеет сложный характер и по-разному проявляется в зависимости от температуры и особенностей растительного покрова.

При рассмотрении зависимости потока диоксида углерода от гидротермических параметров почв по годам так же можно наблюдать сложную картину. Можно предположить, что на поток углекислого газа из почв сильно влияют и другие факторы, а также циклы промерзания-оттаивания и смена более влажных сезонов на более сухие, в том числе за небольшие промежутки времени. В связи с этим можно сделать вывод о том, что простой эмпирической модели для объяснения данной взаимосвязи недостаточно. Для этой цели необходимо учесть физические процессы и зависимость биологической активности от других факторов.

а)



б)

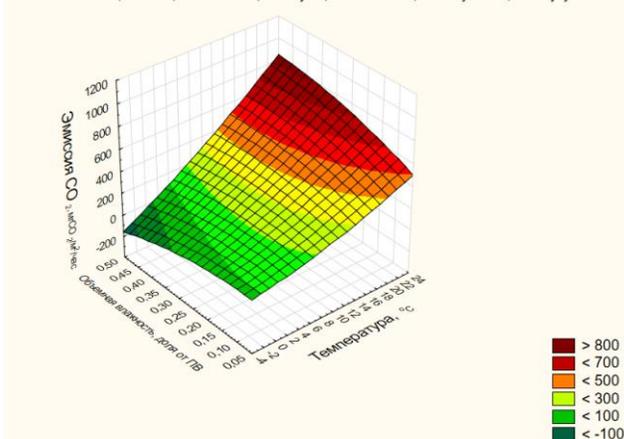


Рис. 4. Зависимость эмиссии CO₂ из почв под лиственными (а) и хвойными (б) насаждениями дендрария Ботанического сада МГУ от взаимодействия гидротермических параметров по массиву данных за 5 лет (2017-2021).

Выводы

Полученные в результате многолетнего круглогодичного исследования данные свидетельствуют о четкой зависимости потока CO₂ от температуры поверхностного горизонта почв. Зависимость эмиссии углекислого газа от влажности имеет сложный характер. На нее влияет температура, характер растительного покрова и другие факторы.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800321-4 «Индикаторы трансформации биогеохимических циклов биогенных элементов в природных и антропогенных экосистемах»).

Литература

- Гончарова О. Ю., Матышак Г. В., Елумеева Т. Г., Воронежский В. И. (2012) Практические задачи по экологии и биогеографии для студентов факультета почвоведения по специальности экология. МАКС Пресс Москва. — 84 с. <https://istina.msu.ru/publications/book/2857990/>
- Гончарова О.Ю., Семенюк О.В., Матышак Г.В., Бобрик А.А. (2016) Сезонная динамика продукции CO₂ почвами дендрария Ботанического сада МГУ им. М.В. Ломоносова. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение.* - № 2. - С. 3–10. <https://istina.msu.ru/publications/article/24086314/>
- Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. (2010) Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва–атмосфера. Томск: Изд-во ТГПУ. 104 с. https://www.researchgate.net/publication/283960283_Fizikohimia_i_biologia_torfa_Metody_izmerenia_gazoobmena_na_granice_pocva-atmosfera
- Исаева А.В. (2022) Комплексная оценка газовой функции почв Ботанического сада МГУ. Магистерская работа. М. 62 с.
- Классификация и диагностика почв России (2004). Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И. И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена. 258 с. <https://istina.msu.ru/publications/book/1833907/>
- Матышак Г.В., Тархов М.О., Рыжова И.М., Гончарова О.Ю., Сефилян А.Р., Чуванов С.В., Петров Д.Г. (2021) Оценка температурной чувствительности эмиссии CO₂ с поверхности торфяных почв севера Западной Сибири методом трансплантации почвенных монолитов. *Почвоведение.* 7, 815–826. <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S0032180X21070108>
- Москва: геология и город (1997). Под ред. В.И. Осипова и О.П. Медведева. М.: Московские учебники и картолитология, 399 стр. http://mmtk.ginras.ru/pdf/Moscow_geology_and_city.pdf
- Раппопорт А.В. (2004) Антропогенные почвы городских ботанических садов (на примере Москвы и Санкт-Петербурга). Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. М. 152 с.
- Розанова М.С., Прокофьева Т.В., Лысак Л.В., Рахлеева А.А. (2016) Органическое вещество почв Ботанического сада МГУ им. М.В.Ломоносова на Ленинских Горах. *Почвоведение.* 9, 1079–1092. <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.7868/S0032180X16090124>
- Смагин А.В. (2005) Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та. 301 с. <https://istina.msu.ru/publications/book/5167097/>

- Смагин А. В. (2015) Кинетическая оценка газообмена между почвой и атмосферой камерно-статическим методом. *Почвоведение*. **7**, 824. – DOI 10.7868/S0032180X15070102. <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.7868/S0032180X15070102>
- Справочник эколого-климатических характеристик Москвы (2005). Под ред. д.г.н. Исаева А.А., М.: Изд-во МГУ, т.2, 409 с. https://www.researchgate.net/publication/282030149_Spravocnik_ekologo-klimaticheskikh_harakteristik_Moskvy_tom_2
- Удовенко М.М. (2018) Годовая динамика продукции диоксида углерода антропогенными почвами: влияние абиотических и биотических факторов. Магистерская работа. М. 74 с.
- Blagodatsky S., Smith P. (2012) Soil physics meets soil biology: towards better mechanistic prediction of greenhouse gas emissions from soil. *Soil Biology and Biochemistry*. **47**, 78-92. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071711004391>
- IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
- Kirschbaum M.U.F. (2006) The temperature dependence of organic matter decomposition – still a topic of debate. *Soil Biol. Biochem.* **38**, 2510–2518. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071706001416>
- Kurganova, I., Lopes de Gerenyu, V., Khoroshaev, D., Myakshina, T., Sapronov, D., & Zhmurin, V. (2022) Temperature sensitivity of soil respiration in two temperate forest ecosystems: the synthesis of a 24-year continuous observation. *Forests*. **13(9)**, 1374. <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/9/1374>
- Mukhortova, L.; Schepaschenko, D.; Moltchanova, E.; Shvidenko, A.; Khabarov, N.; See, L. (2021) Respiration of Russian soils: Climatic drivers and response to climate change. *Sci. Total Environ.* **785**, 147314. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147314>
- Riveros-Iregui D.A., McGlynn B.L., Epstein H.E., Welsch D.L. (2008) Interpretation and evaluation of combined measurement techniques for soil CO₂ efflux: Discrete surface chambers and continuous soil CO₂ concentration probes. *J. Geophys. Res.* **113**, G04027. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JG000811>

Tuomi M., Vanhala P., Karhu K., Fritze H., Liski J. (2008) Heterotrophic soil respiration – comparison of different models describing its temperature dependence. *Ecological Modelling*. **211**, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.09.003>

УДК 631.432.2

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ВЛАЖНОСТИ ТУНДРОВЫХ ПОЧВ СЕВЕРО-ВОСТОКА ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

Каверин Д.А., Пастухов А.В.

Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация
dkav@mail.ru

AUTOMATED MONITORING OF WATER CONTENT IN TUNDRA SOILS IN EUROPEAN
NORTHEAST RUSSIA

Kaverin D.A., Pastukhov A.V.

Institute of Biology, Federal Research Center Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences, Syktывkar, Russian Federation

Annotation: The features of the seasonal dynamics of volumetric water content in automorphic soils developed on silty loamy soil-forming rocks (southeast of the Bolshezemelskaya tundra) were studied. The studies were carried out in permafrost-affected gleyzem and organic-cryometamorphic soil, functioning under moss-shrub and shrub tundra communities, respectively.

Введение

В настоящее время почвы арктических геосистем становятся особенно чувствительными к изменению климата, где основным индикатором становится их режимная компонента, и в особенности гидротермический режим почв (Clayton et al., 2021). Исследование динамики влажности почв криолитозоны является одним из актуальных вопросов почвоведения и геокриологии. От влажности зависит температуропроводность почв (Архангельская и др., 2005), определяющая почвенный температурный режим и глубину сезонного протаивания (Clayton et al., 2021). Влажность почв – критическая информация в климатическом моделировании (Dubois et al., 1995; Анисимов и др., 2020). Исследование пространственно-временного распределения почвенной влаги актуально при анализе динамики растительности, теплофизических свойств почв, биохимических и физико-химических процессов (Dafflon et al., 2014). Исследования динамики влажности почв актуальны в регионах с многолетнемерзлыми породами, существенно влияющими на гидрологию ландшафтов (Volokitin et al., 2019; Li et al., 2022). В последние десятилетия исследованиям функциональных свойств почв способствует ускоренное развитие программной, приборной и методической базы (Красильников, Таргульян, 2019). Среди современных приборов наибольшую эффективность показали таковые, измерения которых основаны на электрических сигналах (Lekshmi et al., 2014). Внедрение логгерных технологий кардинально расширило возможности изучения почвенных режимов в сравнении со стационарными

измерениями. Целью работы является исследование сезонной динамики объемной влажности почв южной тундры, проведенное с использованием современных цифровых логгеров.

Объекты и методы

Исследуемый район находится в юго-восточной части Большеземельской тундры (рис. 1). Изучаемая территория характеризуется суровым субарктическим климатом и массивно-островным распространением многолетнемерзлых пород (ММП) (Геоэкологическая, 1998).



Рис. 1. Географическое положение объектов исследований.

В качестве объектов исследований выбраны почвы естественных тундровых экосистем на пылеватых суглинках (рис. 1, табл. 1). Профиль 1 – глеезем криометаморфический мерзлотный: O(0-7 см) - T(7-9 см) – G (9-26 см) – BG (26-38 см) – Bcm (38-65 см) – Bg (65-87 см) - Cg \perp (87-120 см). Профиль 2 – органо-криометаморфическая глеевая на средних пылеватых суглинках: O (0-3 см) - Bg (3-30 см) - CRM1 (30-60 см) - CRM2 (60-89 см) – BC (89+ см). Для измерений динамики влажности почвенных горизонтов применили электронные метеостанции H-21-001 компании Onset Hobo (США). Данные приборы активно применяются для мониторинга объемной влажности почв при режимных исследованиях (Weindorf et al., 2011), поскольку работают при температурах от -20 до +50 °С. К каждой

микростанции кабелями через серийный порт 3,5 мм присоединены сенсоры влажности S-SMC-M005. Точность измерений сенсоров составляет $\pm 0,031 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ($\pm 3,1\%$) в минеральных почвах и $\pm 0,020 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ($\pm 2\%$) для любых типов почв, для которых проведена калибровка прибора. Диапазон измерений сенсора -0,401 до 2,574 $\text{м}^3/\text{м}^3$, чувствительность датчика – 0,0007 $\text{м}^3/\text{м}^3$ (0,07%), диапазон работы сенсора – 70 МГц.

В пределах минеральных сезонно-талых горизонтов объемная влажность обычно хорошо коррелирует с весовой (Phillips et al., 2015), что используется для калибровки электронных приборов. Поэтому значения измерений объемной влажности станцией Novo H-21 сопоставили с таковыми, полученными на основе определения весовой влажности в полевых условиях. Образцы почв, предварительно измеренные на объемную влажность с помощью Novo H-21, отбирали в алюминиевые бюксы объемом 503 см^3 . Определяли вес как сырого образца в полевых условиях, так и после высушивания до воздушно сухого состояния. Полевую объемную влажность почв рассчитывали по формуле: $Wv = m_w/V_t P_w$ (1), где Wv – объемная влажность, V_t – общий объем почвенного образца, P_w – плотность воды, m_w – масса воды. Объемный вес почв рассчитан по формуле: $P_b = m_w/V_t$ (2). Калибровка Novo H-21 по данным полевой весовой влажности, пересчитанной на объемную, показала удовлетворительную, но не высокую сходимость результатов ($R^2 = 0,5857$). В связи с этим для калибровки показателей объемной влажности почв, полученных с помощью Novo H-21, использовали портативный влагомер Delta-T HH2 с сенсором ML3 Theta Probe (точность 0,1%). Проводили трехкратные измерения сенсорами обоих приборов на глубинах 10, 20 и 30 см в обоих профилях. По результатам измерений построена калибровочная кривая с уравнением (рис. 2).

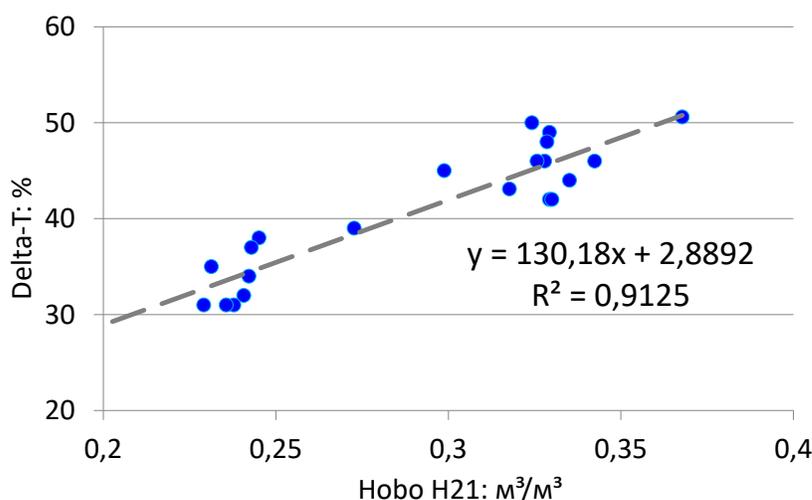


Рис. 2. Калибровка значений объемной влажности исследованных почв для Novo H-21 по данным сенсора HH2 Delta-T.

Результаты и обсуждение

Среднее двухлетнее содержание объемной влажности (36 ± 3 %) в глееземе было на 6 ± 1 % выше, чем органо-криометаморфической почвы (рис. 3). Профильное распределение значений измеренной влажности в слое 10-30 см обеих почв имеет принципиальные различия. В профиле 1 объемная влажность в пределах поверхностных горизонтов снижается, тогда как в профиле 2 наоборот – повышается (рис. 3). Среднее за 2019-2021 гг. содержание объемной влаги на нижней границе поверхностного горизонта (глубина 30 см) в обоих профилях составило 35 ± 1 %. Средняя объемная влажность горизонта G (10-20 см) со значительным оглеением (профиль 1) была 36 ± 2 %, тогда как в поверхностном горизонте Bg с признаками сезонного оглеения (профиль 2) – 29 ± 1 %.

Различия в среднемесячных значениях влажности горизонтов между профилями резко убывают с глубиной от 10 см (13 ± 2 %) до 30 см (0 ± 2 %). Максимальные различия среднемесячных значений влажности почв (до 24 %) наблюдаются в теплую половину года на глубине 10 см, на глубинах 20-30 см различия выражены в меньшей степени, особенно в зимние месяцы. В обоих профилях с глубиной снижаются стандартные отклонения (S) значений влажности с 2 ± 1 % до 1 ± 0 %. В профиле 1 максимальные значения влажности почв на глубине 10 см фиксируются с июня по ноябрь (рис. 3), на глубине 20-30 см – в июле – декабре. В профиле 2 период повышенной влажности приурочен к июню-июлю, тогда как на 20-30 см он более продолжителен (июнь – декабрь). При этом в органо-криометаморфической почве наблюдается выраженный максимум влажности в июне (период оттаивания верхних горизонтов) на всех глубинах, тогда как в глееземе отдельных месячных пиковых значений не наблюдается.

Степень дренированности обуславливает различия профильного распределения влаги исследуемых почв. Средние двухлетние значения объемной влажности горизонта G на глубине 10 см (профиль 1) почти в 1,5 выше таковых горизонта Bg (профиль 2). В профиле 1 влага в значительной мере накапливается в верхнем глеевом горизонте. Слабая степень дренированности глеезема маркируется ярко выраженной сизой окраской поверхностного минерального горизонта и повышенной мощностью органогенного горизонта (около 10 см). Совокупность этих признаков приближает профиль 1 по морфологическому строению к полугидроморфным торфяно-глееземам (Классификация, 2004). Торфяно-глееземы в сочетании с глееземами широко распространены в тундре, занимая слабодренированные участки водоразделов и пологих склонов, где затруднен отток атмосферных осадков (Государственная, 2000). Распределение влаги в органо-криометаморфической почве подчеркивает лучшую дренированность профиля, при которой влага мигрирует вниз по профилю, не накапливаясь в верхнем горизонте. В морфологическом строении поверхностный горизонт таких почв характеризуется лишь признаками сезонного (непостоянного) оглеения (Русанова, Шахтарова, 2013).

Таким образом, максимальная степень дренированности органо-криометаморфических почв среди суглинистых профилей (Классификация, 2004; Полевой, 2008) подтверждается не только слабым оглеением профиля, но и увеличением содержания влаги с глубиной в верхних горизонтах.

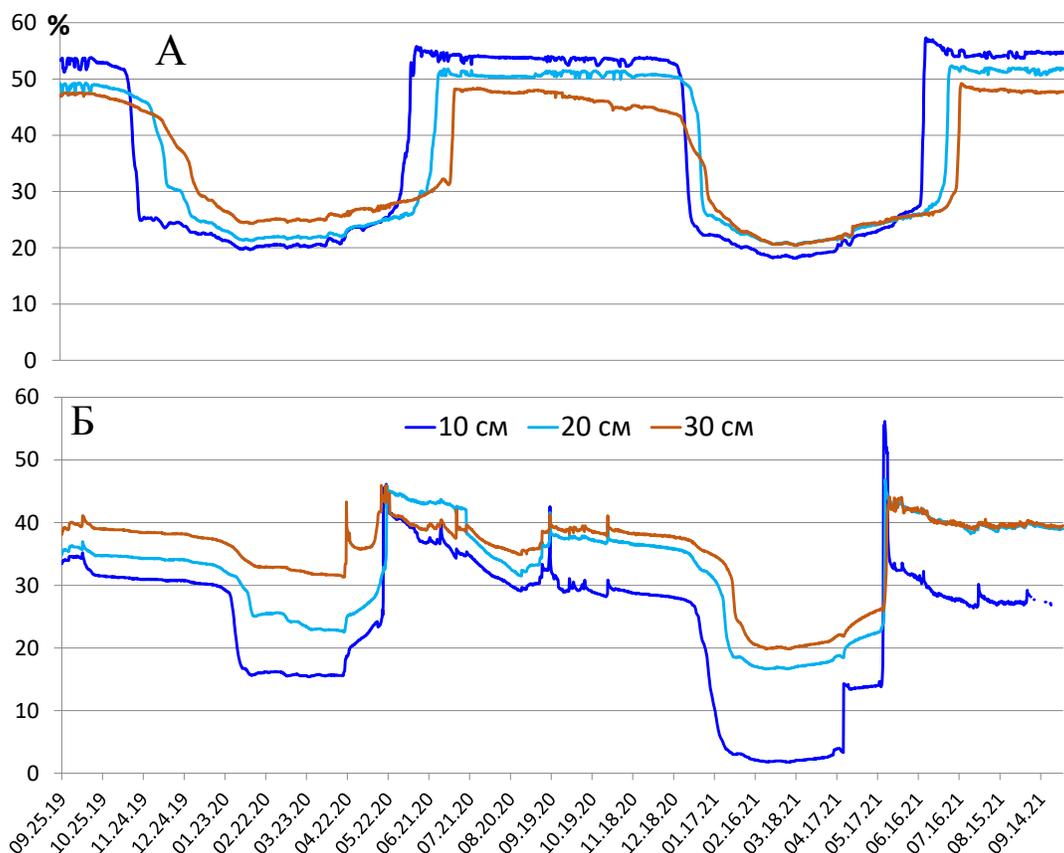


Рис. 3. Динамика объемной влажности почв (%): глеезема мерзлотного – профиль 1 (А) и органо-криометаморфической почвы – профиль 2 (Б).

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке тема Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600023-8 «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов».

Литература

Анисимов О.А., Лавров С.А., Жирков А.Ф., Каверин Д.А. (2020) Модельная ассимиляция и реанализ геокриологических данных: постановка задачи и

- валидация модели для Европейского Севера и Восточной Сибири. *Метеорология и Гидрология* **4**, 85-94.
- Архангельская Т.А., Худяков О.И., Бедрина Т.Н., Митусов А.В. (2005) Латеральная изменчивость агрофизических показателей и неоднородность гидротермического поля в комплексном почвенном покрове южного Подмосковья. *Вестник Московского ун-та Сер. 17. Почвоведение* **2**, 8-15.
- Геокриологическая карта СССР, масштаб 1:2,5 млн. Отв. ред. Ершова Е.Д., Кондратьева К.А.. М. : Мин. геологии СССР и МГУ, 1998, 16 л.
- Государственная почвенная карта России, масштаб 1:1 млн. Лист Q-41 «Воркута» / Отв. ред. Л. Л. Шишов. – М.: ФСГКР, 2000.
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л. Л. Шишов, В. Д. Тонконогов, И. И. Лебедева, М. И. Герасимова. – Смоленск : Ойкумена, 2004. – 342 с.
- Красильников П.В., Таргульян В.О. (2019) На пути к «новой географии почв». *Почвоведение* **2**, 131-139.
- Русанова Г.В., Шахтарова О.В. (2013) Особенности автоморфного почвообразования в ландшафтах Большеземельской тундры. *Известия Коми научного центра УрО РАН, Выпуск 3(15)*, 27-34.
- Clayton L., Schaefer K., Battaglia M., Bourgeau-Chavez L., Chen J., Chen R., Chen A., Bakian-Dogaheh K., Grelik S. L., Jafarov E., Liu L., Michaelides R., Moghaddam M., Parsekian A., Rocha A., Schaefer S., Sullivan T., Tabatabaenejad A., Wang K., Wilson C., Zebker H., Zhang T., Zhao Y. (2021) Active layer thickness as a function of soil water content. *Environmental Research Letters* **16(5)**. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/abfa4c>
- Dafflon B., Hubbard S.S., Peterson J., Ulrich C., Oktem R., Curtis J.B., Tran A.P., Wu Y., Cable W., Romanovsky V.E. (2014). Estimating Arctic Tundra Soil Water Content Variability and Relationship to Landscape Properties Using Above- and Below-Ground Imaging. *American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, CA, December 15-19*.
- Dubois P. C., Zyl J., Engman T. (1995) Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **33**, 915-926.
- Lekshmi S.S.U., Singh D.N., Baghinic M.S. (2014) A critical review of soil moisture measurement. *Measurement* **54**, 92-105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- Li Z.; Zhao L.; Wang L.; Zou D.; Liu G.; Hu G.; Du E.; Xiao Y.; Liu S.; Zhou H.; Xing Z.; Wang C.; Zhao J.; Chen Y.; Qiao Y.; Shi J. (2022) Retrieving Soil Moisture in the Permafrost Environment by Sentinel-1/2 Temporal Data on the Qinghai-Tibet Plateau. *Remote Sensing* **14**, 5966. <https://doi.org/10.3390/rs14235966>

- Phillips M.R.; Burn C.R.; Wolfe S.A.; Morse P.D.; Gaanderse A.J.; O'Neill H.B.; Shugar Dan H.; Gruber S. (2015) Improving water content description of ice-rich permafrost soils. *Conference: 7th Canadian Permafrost Conference, At Quebec City 1*, DOI: 10.13140/RG.2.1.4760.1126.
- Volokitin M., Ostroumov V., Fedorov-Davydov D., Bykhovets S., Abramov A., Kholodov A., Davydova A., Davydov S. (2019) Features of Automated Soil Moisture Monitoring. *Abstracts of the International conference «Solving the puzzles from cryosphere»*, Pushchino, Russia, April 15-18, 126-127.
- Weindorf D.C., Haggard B., Rusu T., Soptorean M., Cacovean H. (2011) Interpretations of soil properties and soil climate in the Transylvanian plain, Romania. *Scientific Papers, UASVM Bucharest, Series A LIV*, ISSN 1222-5339.

УДК 631.43

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СЕРОГУМУСОВЫХ ПОЧВ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ШПИЦБЕРГЕНА

Кашулина Г.М., Литвинова Т.И.

Полярно-альпийский ботанический сад-институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия
galina.kashulina@gmail.com

FEATURES OF THE TEMPERATURE REGIME OF UMBRISOLS ON THE SOUTH-WEST COAST
OF SVALBARD

Kashulina G.M., Litvinova T.I.
Polar-alpine botanical garden-institute KSC RAS, Apatity, Russia

Annotation: Umbrisols of the southwestern coast of Svalbard are characterized by negative average annual temperatures (-2 - -3°C), deep active layer (0.6-2 m), and a small sum of positive temperatures (300-500 °C) with a relatively long period with positive temperatures (4-5 months) in the entire profile.

Введение

Благодаря более влажному и мягкому арктическому климату, а также глубокому залеганию вечной мерзлоты – 0.6-2 м (Осокин, Сосновский, 2008) на участках под сплошным или фрагментарным мохово-(лишайниково)–ивковым покровом в условиях свободного поверхностного и внутрпочвенного дренажа на юго-западном побережье Шпицбергена формируются хорошо развитые серогумусовые грубогумусовые почвы (Переверзев, Литвинова, 2010). Характерной особенностью этих почв является высокая и глубокая гумусированность профиля. Температурный режим серогумусовых грубогумусовых почв был изучен в составе комплексного изучения особенностей формирования таких развитых, высокогумусированных почв в условиях высокой Арктики (Кашулина и др., 2021).

Объекты и методы

Юго-западное побережье Шпицбергена характеризуется более мягким и влажным арктическим климатом благодаря влиянию одного из ответвлений теплого Атлантического течения Гольфстрим. Что обуславливает достаточно большую мощность активного слоя в этой части Шпицбергена, где она в зависимости от характера грунта варьирует от 0.6 до 2 м (Осокин, Сосновский, 2008). Типичные серогумусовые грубогумусовые почвы состоят из следующего набора генетических горизонтов O(AO)-AYao-AYaoC (Переверзев, Литвинова, 2010; Кашулина и др., 2021). Характерной особенностью этих почв является высокая и глубокая гумусированность профиля.

Наблюдения за температурным режимом серогумусовых грубогумусовых почв велись на 4-ех стационарных площадках, расположенных на склонах горного хребта Гренфьорд около пос. Баренцбург (табл. 1). Номер площадки соответствовала ее абсолютной отметке над уровнем моря. На пл. 92 и 141 растительность представлена сплошным покровом из мха и ивки полярной, на пл. 252 – этот покров фрагментарный, а на пл. 244 – отдельной небольшой куртиной среди россыпей камней.

Зависимость температурных показателей на глубине 2 см в верхнем органогенном горизонте О от ландшафтных условий изучали на 4-ех стационарных площадках: пл. 92, 141, 252 и 244. Температурные регистраторы марки iButton были установлены на глубине 2 см (нижняя часть гор. О). Температура измерялась 8 раз за сутки с интервалом 3 часа в период с 20 июля 2016 по 2 августа 2017 года.

Таблица 1. Координаты и ландшафтная характеристика стационарных площадок

Площадка	Координаты	Рельеф	Уклон, °
Пл. 92	N: 78°03'30.5" E: 14°13'23.4"	Пологий солифлюкционный склон, юго-западная экспозиция	15
Пл. 141	N: 78°03'33.4" E: 14°13'50.8"	Вторая морская терраса, юго-западная экспозиция	5
Пл. 252	N: 78°03'41.8" E: 14°14'25.6"	Вершина горного хребта	2-3
Пл. 244	N: 78°03'40.4" E: 14°14'41.2"	Противоположный крутой склон, северо-восточная экспозиция	45

Распределение температурных показателей по профилю серогумусовых грубогумусовых почв изучали на двух площадках - пл. 92 и 141. Измерения температуры проводили с 14.07.2018 по 28.08.2019 года 6 раз в сутки. Температурные регистраторы были установлены в гор. О на глубине 2 см, в середине дернового грубогумусового горизонта АУао на глубине 8-10 см и в переходном горизонте АУаоС на глубине 20, 40 и 60 см. Температуру воздуха на высоте 2 м за эти периоды представляли архивные данные метеостанции «Баренцбург» (<http://www.rp5.ru>).

Результаты и обсуждение

Влияние ландшафтного положения

Среднегодовая температура верхнего органогенного горизонта серогумусовых грубогумусовых почв на всех площадках горного склона хребта Гренфьорд была отрицательной, сумма отрицательных температур значительно превосходила сумму положительных температур, продолжительность периода с отрицательными температурами была выше чем положительных, максимальные среднесуточные температуры были ниже 10°C (табл. 2). Различия между площадками по

большинству температурных показателей были существенными: по средней температуре за год и максимальной среднесуточной площадки различались на 1.4°C, по минимальной среднесуточной - на 7°C, по амплитуде - на 11°C, по сумме отрицательных температур - на 500°C, по сумме температур >5°C - более чем на 100°C и по продолжительности периода с температурами >5°C - на 15 дней. При относительно небольшом градиенте высот (всего 160 м) распределение температурных показателей между площадками определялось не абсолютной отметкой, а их положением в ландшафте и формой поверхности. При этом для каждой площадки было свойственно свое специфическое сочетание усредненных за год температурных показателей.

Самая низкая средняя и минимальная температура, а также самая большая сумма отрицательных температур была свойственна гор. О на пл. 252, расположенной на вершине хребта. Это было обусловлено наиболее сильным охлаждением почвы в зимний период из-за сдувания снега (выпуклая форма рельефа). В то же время благодаря открытости места и круглосуточному поступлению солнечной энергии в летний период почва на этой площадке характеризовалась самой высокой максимальной температурой, самой большой суммой температур более 5°C и наибольшей продолжительностью периода с T>5°C. Наиболее интенсивный прогрев в летний период и наиболее сильное охлаждение в зимний период обусловили и самую высокую амплитуду температур в гор. О на этой площадке.

Таблица 2. Основные показатели температурного режима горизонта О серогумусовых почв на глубине 2 см на стационарных площадках и воздуха по данным ГМО Баренцбург ([http:// www.rp5.ru](http://www.rp5.ru)) за период с 29.07.2016 по 28.07.2017 года

Показатель	Пл.92	Пл.141	Пл.252	Пл.244	Воздух*
Средняя за год температура, °С	-1.9	-1.4	-2.8	-1.7	-2.2
Максимальная среднесуточная T, °С	8.6	8.1	9.5	8.6	10.3
Минимальная среднесуточная T, °С	-14.7	-11.0	-18.0	-14.7	-19.9
Годовая амплитуда T, °С	27	21	32	27	36
$\sum T < 0^\circ\text{C}$	-1195	-1041	-1564	-1112	-1506
$\sum T > 0^\circ\text{C}$	501	516	528	498	700
$\sum T > 5^\circ\text{C}$	243	210	320	331	351
Продолжительность, дней					
Со нежным покровом					192
С T < 0°C	211	207	213	208	192
С T > 0°C	154	158	152	157	173
С T > 5°C	40	36	51	50	55

Наименее низкие средняя и минимальная температуры, а также минимальная сумма отрицательных температур были свойственны гор. О на пл. 141, расположенной в средней части геопрофиля на второй морской террасе. Это было обусловлено менее интенсивным охлаждением почвы в зимний период благодаря формированию здесь достаточно мощного снежного покрова (небольшой уклон поверхности). В то же время в летний период эта площадка получала меньше тепла из-за экранирования хребтом в первую половину дня и скользящего характера лучей во второй половине дня из-за небольшого уклона поверхности. Поэтому на ней была отмечена самая низкая максимальная температура, самая низкая сумма температур более 5°C и наименьшая продолжительностью периода с $T > 5^{\circ}\text{C}$.

По большинству температурных показателей гор. О на пл. 92 и пл. 244 занимал промежуточное положение между пл. 141 и 252. При этом по многим показателям пл. 92 и 244 не отличались между собой (табл. 2). Но их одинаковые значения были обусловлены разным сочетанием факторов. Например, при одинаковой максимальной температуре (8.6°C) на пл. 92 была обеспечена сочетанием небольшого уклона поверхности и высоким положением солнца (юго-западный склон), а на пл. 244 – большим уклоном поверхности и низким положением солнца (северо-восточный склон). На пл. 92 минимальная температура -14.7°C была обеспечена небольшой мощностью снега (сдувался) и пришлась на самый холодный месяц – март, на пл. 244 – этот минимум пришелся на первые сильные морозы, пока мощность снега была недостаточно большой.

Несмотря на существенные различия по большинству температурных показателей между площадками, некоторые, наиболее важные показатели, как оказалось, практически не зависели от локальных особенностей места. Такими показателями были сумма положительных температур и продолжительность периодов с положительными и отрицательными температурами.

Распределение по профилю почв

Сезон 2018/2019 гг. (рис.1) был холоднее по сравнению с 2016/2017 гг. (табл. 2). Для воздуха и всех горизонтов серогумусовых грубогумусовых почв на пл. 92 и 141 в сезон 2018/2019 гг. средние за год температуры также были отрицательными. На пл. 92 (заморозки начались до начала формирования снежного покрова, зимой снег сдувался) средняя за год температура в большинстве горизонтов почвы была ниже, чем в воздухе. Самая низкая средняя за год температура была свойственна верхнему органогенному гор. О, наименее низкая – на глубине 20 см.

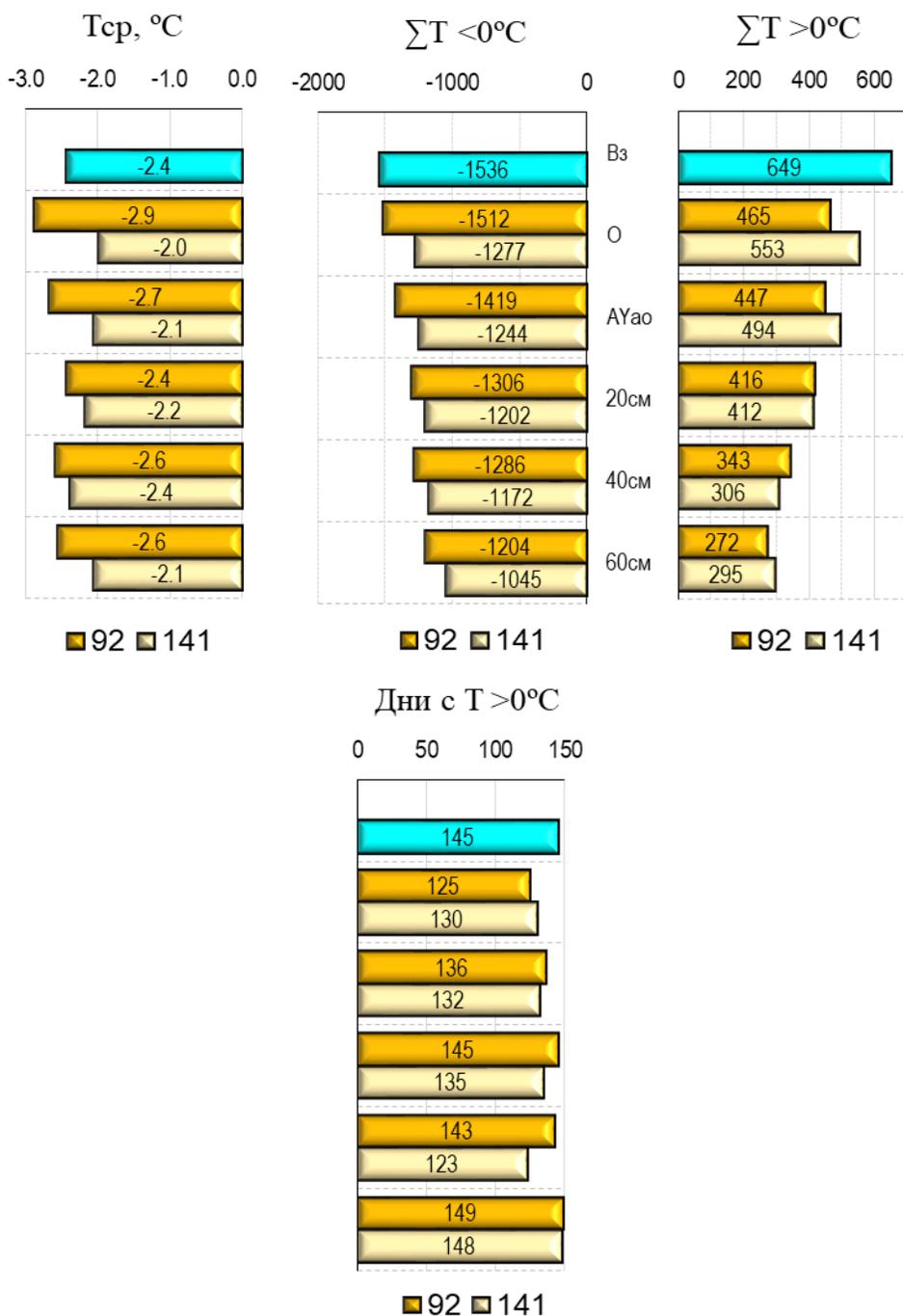


Рис. 1. Распределение основных температурных показателей по профилю серогумусовых грубогумусовых почв: в гор. О на глубине 2 см, в гор. АУао на глубине 8-10 см и в горизонте АУаоС на глубине 20, 40 и 60 см на пл. 92 и 141, а также воздуха (Вз) по данным ГМО «Баренцбург» ([http:// www.rp5.ru](http://www.rp5.ru)) в период с 29.07.2018 по 28.07.2019 г.

На пл. 141 (наличие снежного покрова), наоборот, температура большинства горизонтов была выше по сравнению с воздухом. Самая низкая средняя температура на пл. 141 была приурочена к глубине 40 см, наименее низкая – к верхнему органогенному горизонту О. Сильная каменистость и глубокие трещины обеспечивают интенсивную аэрацию и высокую интенсивность воздухообмена с атмосферой на большую глубину. Поэтому градиент средних за год температур в профиле почв на обеих площадках был очень небольшим – 0.5°C на пл. 92 и 0.4°C на пл. 141.

Максимальная сумма отрицательных температур была приурочена к верхнему органогенному горизонту почв и постепенно снижалась с глубиной на обеих площадках, при этом на пл. 92 она была существенно выше по сравнению с пл. 141. Сумма положительных температур в профиле почв на обеих площадках была в 2-3 раза ниже суммы отрицательных. Ее максимум также был приурочен к гор. О, но с глубиной она снижалась более значительно по сравнению с суммой отрицательных. Еще более резкое снижение с глубиной было характерно для суммы температур более 5°C: в профиле почвы на пл. 92 она варьировала от 227 в гор. О до 0°C на глубине 60 см, на пл. 141 она была значительно выше и варьировала от 436 до 46°C. Среднесуточные температуры выше 10°C были отмечены только в гор. О на пл. 141 в отдельные сроки наблюдений.

Продолжительность периода с отрицательными температурами во всех горизонтах была в 2-3 раз выше по сравнению с положительными. Наименьшая продолжительность периода с положительными температурами пришлась на верхний органогенный горизонт О. В минеральной части профиля она была выше и достигала максимума (около 150 дней) на глубине 60 см. Как и сумма температур выше 5°C, продолжительность этого периода резко убывала с глубиной. В верхнем органогенном горизонте и диагностическом горизонте почвы на пл. 92 он продолжался около месяца, на пл. 141 – от 1.5 до 2 месяцев, соответственно. На глубине 60 см на пл. 92 такие температуры не были отмечены, на пл. 141 наблюдались только в течение 9 дней.

Согласно классификации Димо (1972) серогумусовые грубогумусовые почвы юго-западной части острова Западный Шпицберген следует отнести к мерзлотному типу. По глубине оттаивания почва на пл. 92 (вечная мерзлота залегает на глубине около 2 м) почва является средне-глубокооттаивающей. Двустороннее промерзание в пределах 60 см было выявлено только в почве на пл. 92 (вечная мерзлота на уровне 1.8-2 м). Различия средних температур для самого теплого месяца (июль) и самого холодного (март) составили 15.6 и 15.2°C для пл. 92 и 141, соответственно. И по этому показателю эти почвы попадают в диапазон характерный для почв с самой низкой сезонной контрастностью.

Из-за значительного потепления климата в Арктике (Rantanen et al., 2022), температура воздуха по данным гидрометеорологической обсерватории Баренцбург

([http:// www.rp5.ru](http://www.rp5.ru)) в период проведения данных исследований была значительно выше (средняя за 2010-2020 гг. составила -2.7°C) по сравнению с предшествующим периодом (средняя за период с 1932 по 2010 гг. составила -5.2°C). Поэтому полученные данные по температурному режиму серогумусовых грубогумусовых почв характеризуют лишь современный, наиболее теплый период времени. Ориентировочные ретроспективные и прогнозные оценки температуры этих почв могут быть получены на основе функциональной зависимости между температурой почв и воздуха (Димо, 1972; Шерстюков, 2008).

Выводы

Благодаря влиянию теплого Атлантического течения Гольфстрим для серогумусовых почв юго-западного побережья острова Западный Шпицберген было характерно специфичное для Арктики сочетание основных температурных показателей: отрицательные среднегодовые температуры ($-2 - 3^{\circ}\text{C}$) и небольшая сумма положительных температур ($200 - 500^{\circ}\text{C}$) сочеталась с глубоким сезонным оттаиванием почвы (до 0.6-2.0 м) и относительно большой продолжительностью периода с положительными температурами (4-5 месяцев) во всем профиле.

Литература

- Димо В.Н. (1972) Тепловой режим почв СССР. М.: Колос. 360.
- Кашулина Г.М., Литвинова Т.И., Коробейникова Н.М. (2021) Почвы юго-западного побережья острова Западный Шпицберген // *Труды Кольского научного центра РАН. Серия Прикладная экология Севера*. **9**, 271-275. <https://doi.org/10.37614/2307-5252.2021.6.12.9.040>.
- Осокин Н.И., Сосновский А.В. (2008) Влияние климатических изменений на термический режим многолетнемерзлых пород на архипелаге Шпицберген. *Природа шельфа и архипелагов европейской Арктики* **8**, 280-284.
- Переверзев В.Н., Литвинова Т.И. (2010) Почвы морских террас и коренных склонов на побережьях фьордов острова Западный Шпицберген. *Почвоведение* **3**, 259-269.
- Шерстюков А.Б. (2008) Корреляция температуры почво-грунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России. *Криосфера Земли*. **XII** (1), 79–87.
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., and Laaksonen, A. (2022) The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth Environ.* **3** (168), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

УДК 631.616

ОСУШЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ГИДРОМОРФНЫХ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ: ОПЫТ ПРОШЛОГО И ВЫЗОВЫ СОВРЕМЕННОСТИ

Ковалев И.В.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
kovalevmsu@mail.ru

DRYING OF MINERAL HYDROMORPHIC LOAM SOILS: PAST EXPERIENCE AND MODERN
CHALLENGES

Kovalev I.V.

Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

Annotation: Pottery trench and plastic trenchless drainage have similar agroecological and hydrological effects on heavy loamy hydromorphic soils. The transformation of the physical and chemical properties and humus status of soils drained by different types of drainage is shown. Challenges of our time: drainage as a part of soil engineering, designed to solve specific soil engineering problems of environmental management and develop environmentally friendly engineering technologies for managing the properties of soils and landscapes.

Введение

Минеральные гидроморфные почвы являются одним из основных объектов осушения, особенно почвы начальных стадий заболачивания, занимающие основные площади сельскохозяйственного использования. Более заболоченные, (глеевые, перегнойно-глеевые) имеют ограниченную территорию и приурочены к отрицательным элементам ландшафта (урочища, днища балок, нижние части склонов). Вместе с тем целесообразность осушения минеральных гидроморфных почв должна базироваться на анализе водного режима и продуктивности непрерывных рядов почв (обычно от водоразделов до низин). Действительно, важное значение для оценки водного режима, дифференциации почв по степени заболоченности, для оценки преимуществ разных видов дренажа, имеют данные об урожайности основных районированных культур в годы различной влажности. На основе таких данных в результате многолетних стационарных исследований выделяют виды почв по степени оглеения, для которых разрабатывается диагностика, в том числе, основанная на морфологических и химических свойствах почв. Система диагностических признаков для каждой группы почв, образующих непрерывный ряд, позволяет оценить выбор способа осушения и вид дренажа (Zaidelman F.R., Kovalev I.V., 1998). Индикатором интенсивности почвенных процессов, индуцируемых временным переувлажнением и сменой окислительно-восстановительных обстановок, служат почвенные новообразования, например,

такие как железисто-марганцевые конкреции. Значения коэффициента заболоченности (K_z , отношение Fe/Mn в 1 н. H_2SO_4 вытяжке), адекватно отражают степень заболоченности полугидроморфных тяжелосуглинистых почв с естественным водным режимом. Однако, исследований о целесообразности применения данного коэффициента на почвах, осушенных разными видами дренажа, недостаточно или отсутствуют вовсе. Вместе с тем, на осушенных минеральных гидроморфных почвах данный коэффициент не работает и необходим поиск такого параметра, который адекватно отражал новые гидрологические условия осушенных почв и давал объективную оценку целесообразности проведения реконструкции дренажных систем (Ковалев, 2023).

Дренаж как инженерное мероприятие получил широкое распространение в античный период в Египте, Греции, в 1 в. до н.э. – в Древнем Риме. В X в. в Европе начались работы по устройству осушительных систем в бассейне Северного моря. В Англии в 1252 г. был принят первый закон об осушении сельскохозяйственных земель, а первая система закрытого дренажа в Европе была построена в конце XV в.. В XVI–XVII вв. в Голландии началось строительство польдеров с перекачкой вод из каналов в море с помощью ветряных мельниц. Среднеазиатские культуры уже в средние века активно использовали систему кяризов (каменных дрен) для водоснабжения и водоотведения в городах Великой Степи (Ковалева, Ковалев, 2023).

Считается, что развитие работ по осушению в России первоначально было связано с деятельностью Петра I в связи с освоением побережья Финского залива, строительством Петербурга и других городов, крепостей и заводов. Действие открытых осушительных систем было описано М.В. Ломоносовым в работе «Лифляндская экономика». Однако известны факты осушения стен Новгородского кремля системой каменных дрен в (Новгородский сборник, 1982), а Иркутского острога — с помощью полых стволов лиственницы в 1661 г. В конце XVIII в. А.Т. Болотов (1986) впервые теоретически обосновывает вопросы осушения северных районов России, а также защиту полей с помощью лесонасаждений (Ковалева, Ковалев, 2023).

XX в. — это расцвет масштабной мелиорации сельскохозяйственных земель и реализации грандиозных инженерных проектов природообустройства как во всем мире, так и в России. В начале 60-х годов 20-го столетия основным видом дренажа на сельскохозяйственных угодьях начали широко использовать траншейный (закрытый) гончарный дренаж. До этого времени доминировал открытый способ дренирования, особенно торфяных почв и заболоченных почв в лесных насаждениях, в значительно меньшей мере деревянный, каменный, фашинный. Основные площади заболоченных минеральных гидроморфных почв в нашей стране были осушены гончарным дренажом и площадь всех осушенных почв к концу 1991 г. составила 4,25 млн га. Применение пластмассового дренажа стало возможным

лишь после экспериментальных работ в 1961 году немецким почвоведом-мелиоратором проф. Янертом на легкосуглинистых и песчаных заболоченных почвах. Эффективность пластмассового дренажа на этих почвах позволила широкому внедрению пластмассового дренажа и разработке дренаукладчиков данного вида дренажа в ФРГ и затем в странах Европы с гумидным климатом.

С 1985 года по решению Министерства водного хозяйства РСФСР для ответа на вопрос о возможности осушения тяжелосуглинистых минеральных заболоченных почв с помощью пластмассового бестраншейного дренажа были организованы экспериментально-мелиоративные полигоны в разных биоклиматических условиях, например, в Кировской области, Котельничского района, объект «Ивакинские пашни», в Московской области, Ступинского района, объект «Кочкарево». Устройство пластмассового бестраншейного дренажа позволяет не только повысить производительность труда, но резко сократить нарушение почвенного покрова. Так, при строительстве гончарного дренажа создается траншея шириной 40 см и глубиной до 120 см. При этом мелкозем, подпахотных слоев поступает на поверхность, частично перемешивается с пахотным и после укладки дрен засыпается обратно в траншею, обогащенный органическим веществом по сравнению с аналогичными слоями естественного сложения. При укладке пластмассового дренажа дренаукладчики лишь прорезают почвенные горизонты шириной 12 см, не нарушая естественного сложения подпахотных слоев. Мелкозем, закладываемый над пластмассовой дренай, обогащается гумусом лишь в результате осыпания верхних слоев. В целом на 1 га при междренном расстоянии 16 м траншейные обратные засыпки составляют – 2,45 %, а щелевые – 0,72 % площади. С учетом значительной площади осушенных почв (2,25 млн. га) в Нечерноземье (ЕТС), траншейные засыпки заслуживают отдельного внимания при изучении структуры почвенного покрова.

Комплексные исследования были направлены прежде всего на эколого-гидрологическую оценку суглинистых оглеенных почв, осушенных бестраншейным и траншейным дренажом и оценку влияния пластмассового и гончарного дренажа на физические и химические свойства этих почв, сформированных на суглинистых почвообразующих породах, в частности на покровных лёссовидных бескарбонатных суглинках и пермских карбонатных суглинках и глинах. Основные многолетние режимные исследования водного, окислительно-восстановительно режимов, продуктивности сельскохозяйственных культур в годы разной обеспеченности осадков, модуля дренажного стока, физических и химических свойств в период с 1988 г. по 1998 год позволили рекомендовать для применения пластмассовый бестраншейный дренаж как эффективный вид дренажа на тяжелосуглинистых почвах. Дальнейшие исследования последствий пластмассового и гончарного дренажа позволяют изучать эволюцию осушенных почв и прилегающего ландшафта (Kovalev, 2021).

Объекты и методы

Исследования проведены в Ступинском районе Московской области на светло-серых лесных глееватых почвах («Kochkarevo», N 55° 06' 51" E 38° 18' 32"). Здесь осенью 1988 г. был создан уникальный с точки зрения возможности осуществления режимных стационарных наблюдений экспериментально-мелиоративный полигон по проекту «Мосгипроводхоз», где есть возможность изучать изменение свойств и режимов почв по отношению к первому году действия дренажа на протяжении уже почти 30 лет. Исследования приурочены к фиксированным точкам наблюдений и проведены одними и теми же методами в разные годы обеспеченности осадками, начиная с 1988 года. Дренажные системы, площадью 2–4 га каждая, строились в 3-х кратной повторности для каждого варианта опыта: 1-й – светло-серые лесные глееватые почвы, осушенные пластмассовым дренажом с помощью дреноукладчика МД-4 на глубину 100-120 см и 2-й вариант - эти же почвы, осушенные гончарным дренажом с помощью дреноукладчика ЭТЦ - 202 на ту же глубину с междренним расстоянием – 16 м. Также рассматривались эколого-гидрологические условия, свойственные светло-серым лесным глубокооглееным и глееватым почвам с естественным водным режимом. Все исследованные почвы (неосушенные и осушенные) сформированы на близких или тождественных по гранулометрическому составу породах – крупнопылевато-иловатом покровном суглинке (Kovalev, 2021).

Методы. Свойства и режимы серых оглеенных и осушенных почв исследованы не только классическими, но и современными методами: определение пула лигниновых фенолов методом мягкого щелочного окисления органического вещества оксидом меди в азотной среде с последующим использованием хроматографии тонкого слоя, ^{13}C и ^{31}P -ЯМР-спектроскопия, модифицированная методика определения аминсахаров, определение изотопного анализа углерода органического вещества. Важно отметить, что учет урожая проводили прямым комбайнированием по линиям нормальным к дренам на учетных площадках (2–4 га). В них входила треть площади полигона с гончарным или пластмассовым дренажем, исключая влияние открытых каналов и дрен прилегающего полигона.

Результаты и обсуждение

Элементы водного режима агросерых оглеенных почв, изученные за пятилетний период, сильно различаются по количеству выпадающих осадков. Обеспеченность осадками (вероятность выпадения данного количества осадков в данном ряду в %) за вегетационный период (апрель-октябрь) составила 86 % (сухой год - 315 мм), 33 % (умеренно-влажный - 440 мм), 49 % (умеренно-сухой - 395 мм), 9 % (влажный - 520 мм) и 94 % (экстремально сухой - 256 мм).

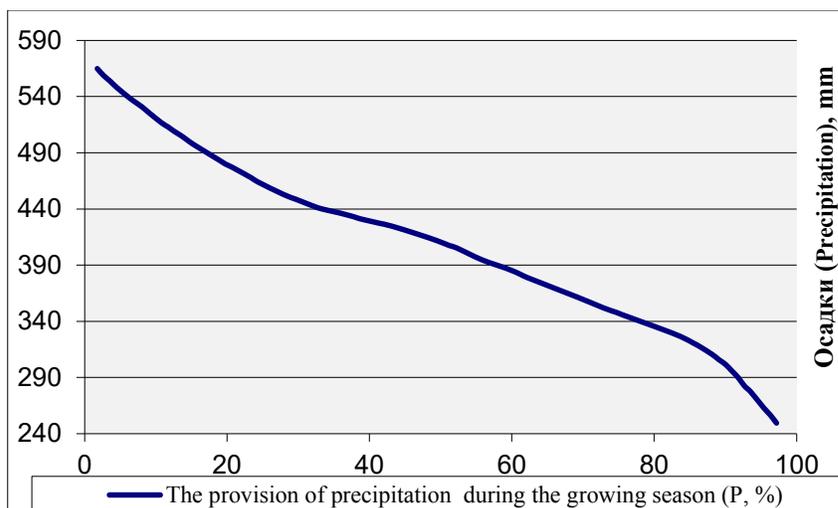


Рис. 1. Кривая обеспеченности осадков за теплый период (IV–X).

Кривая обеспеченности осадков построена по данным Госметеослужбы для Ступинского (Малинского) района, Московской области за 1936–1992 гг.

Показано, что гидрологический режим серых лесных глубокооглеенных почв характеризуется наличием нижнего яруса верховодки после снеготаяния. Особенностью глееватых почв является наличие двухъярусной верховодки, которая сохраняется до начала-середины мая. Ее верхний ярус приурочен к пахотному слою, а нижний располагается на глубине 7–75 см. Между этими двумя горизонтами полного обводнения существуют зоны с влажностью, равной наименьшей влагоемкости (НВ) и в интервале: наименьшая влагоемкость – полная влагоемкость (НВ-ПВ) (Ковалев, 2021). Именно в это время в агросерых глееватых почвах с естественным водным режимом наблюдается снижение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) до 280–300 мВ и возникают анаэробные условия (Ковалев, 2021). Летом обычно наблюдаются выравненные значения ОВП в почвах начальных стадий гидроморфизма (глубокооглеенные -----> глееватые). Эти характерные различия гидрологического и окислительно-восстановительного режимов серых лесных почв разной степени оглеения сказываются статистически значимо на физических и химических свойствах почв, в том числе и в конкреционных новообразованиях. Например, данные по количеству ортштейнов, по распределению содержания железа, марганца, углерода, азота, серы, фосфора, пулу лигниновых фенолов в ортштейнах серых почв Подольско-Коломенского ополья с естественным водным режимом имеют близкие или тождественные значения независимо от обеспеченности года осадками на протяжении 30 лет и позволяют достоверно диагностировать степень заболоченности этих почв даже на уровне видовых различий (глубокооглеенные, глееватые, глеевые почвы) (Ковалев, 2023).

Наблюдения показывают, что дренаж во влажные, средние и сухие годы оказывает весьма существенное влияние на режим влажности глееватых почв. При наличии дренажа в глееватых почвах не только устраняется двухъярусная верховодка, но обычно исчезает гравитационная влага из нижних горизонтов. Влажность почвы при этом на протяжении большей части теплого периода оказывается в оптимальном диапазоне – наименьшая влагоемкость-влажность разрыва капиллярной связи (НВ-ВРК) (Ковалев, 2021). Окислительно-восстановительный потенциал возрастает до 420–470 мВ, обеспечивая господство окислительной обстановки на протяжении сухого периода. Выявлены определенные различия в действии траншейного гончарного и бестраншейного пластмассового дренажа. На протяжении пяти контрастных по влажности лет показано, что с помощью гончарного и пластмассового дренажа может быть достигнут близкий или тождественный эколого-гидрологический эффект. Это позволяет признать, что бестраншейный пластмассовый дренаж без применения траншейных фильтров на серых глееватых почвах с Кф 0,1–0,3 м/сут оказывает такое же или более интенсивное гидрологическое действие, что и гончарный дренаж (Kovalev, Kovaleva, 2019). На серых лесных глееватых почвах, наиболее распространенных минеральных гидроморфных почвах зоны широколиственных лесов, без дренажа складываются весьма стихийные условия. Урожайи здесь нестабильны и колеблются весьма в широком диапазоне, вплоть до вымокания озимых. На осушенных серых глееватых почвах формируются благоприятные условия для возделывания культур полевых севооборотов, особенно озимых культур.

Таблица 1. Урожайность сельскохозяйственных культур на недренированных и дренированных почвах (т/га). Урожайность учитывали прямым комбайнированием (комбайн «Дон-1500») по полосам перпендикулярно дренажным линиям с 2-3-кратным расстоянием, * – методом учетных площадок при $n = 5$ ($P = 0.95$).

Полигоны	Сухой год, 86/73 (Вико- злаковая смесь зерно	Умеренно- сухой год, 33/46 (Озимая пшеница)	Влажный год, 49/25 (Озимая пшеница)	Умеренно- влажный год, 33/46 (ячмень)	Влажный год, 49/25 * (Овёс на силос), $n=5$, $M \pm tp \cdot m$
Контроль	-	Глееватая почва, недренированная (контроль)			
		39,8	6,2	29,0 **	131,3 ± 10,6
		Глееватая почва, дренированная. Пластмассовый дренаж			
П-1	21,2	45,8	29,4	40,4	81,2 ± 20,2
П-2	26,0	51,4	40,0	39,4	75,2 ± 20,7
П-3	25,8	43,2	65,7	25,4	60,6 ± 10,6
Среднее	24,3	46,7	45,0	35,1	72,3
		Глееватая почва, дренированная. Гончарный дренаж			

Г-1	20,6	51,0	34,7	43,2	85,5 ± 17,8
Г-2	25,0	56,0	48,1	37,7	74,2 ± 21,0
Г-3	24,8	46,1	51,0	25,6	58,5 ± 10,7
Среднее	23,5	51,0	44,6	35,5	72,7

* – летний срок сева (20.07); ** – посев на месяц позже из-за полного обводнения;

М – среднее арифметическое; t – критерий Стьюдента; m – ошибка среднего;

86/73 – обеспеченность осадками: за вегетационный период (IV–X)/ за год

Так, при осушении бестраншейным пластмассовым и траншейным гончарным дренажем глееватых почв всегда в средние и влажные по осадкам годы происходит существенное увеличение урожайности сельскохозяйственных культур по сравнению с недренированными глееватыми почвами. Она оказывается близкой к урожайности культур на незаболоченной глубокооглеенной (автоморфной) почве. Оценка разности средних по урожайности культур на почвах, осушенных этими двумя видами дренажа, показывает, что различия не достоверны при 5 % и, как правило, при 1 % уровне значимости (табл. 1).

Полученные данные показывают, что современное агротехническое использование агросерых тяжелосуглинистых полугидроморфных минеральных почв в недренированном состоянии происходит в условиях естественной, весьма изменчивой в течение года влажности почвы. Это приводит к практически полной гибели урожайности зерновых культур во влажные годы или ее снижению в умеренные и засушливые годы. Установлено, что дренаж полностью исключает образование двухярусной верховодки, характерной для этих почв в естественных условиях. Установлена тенденция более интенсивного влияния бестраншейного пластмассового дренажа на режим увлажнения этих почв. В дренированных почвах наблюдается ослабление морфохроматических признаков оглеения (исчезновение охристых пятен с переходом сизовато-серой окраски в серую в нижних горизонтах), а также уменьшение объемной плотности. Повышается водоустойчивость агрегатов, в иллювиальных горизонтах происходит увеличение объема аэрационных, инфильтрационных и водопроводящих пор. Дренаж приводит и к активизации микробиологической деятельности, которая прямо регистрируется по увеличению длины грибного мицелия и общей биомассы микроорганизмов и косвенно – по увеличению доли диэфиров микробного происхождения на ³¹P ЯМР-спектрах: с 6 до 11 % и с 9 до 12 % от площади спектра, а также по увеличению содержания аминокислот и мурамина в почвах (p<0.95). В осушенных почвах наблюдается и преобладание метаболического углерода над ароматическим. Сумма продуктов окисления лигнина падает (p <0.95) с 13 мг/г Сорг. до 9 мг/г Сорг. Возрастает (p <0.99) степень окисленности (отношение сиреневые кислоты/к сиреневым альдегидам) и степень измененности боковых цепочек лигнина (VSC) по отношению к исходным растительным тканям: с 4.6 до 6.5. В результате, наблюдается

увеличение соотношения Сгк:Сфк в гумусовых горизонтах от 0.93-1.18 до 1.53-1.98. Данный факт подтверждается и увеличением на 30 % площади пика углерода карбогидратов в области 60-106 ppm, по результатам ^{13}C ЯМР-спектроскопии, в молекулах ГК агросерых глееватых осушенных почв. В период эффективного действия дренажа происходит изменение гумусного состояния агросерой глееватой почвы, которая по показателям биогенности и биоактивности становится похожа на глубокооуглеенную автоморфную почву (Ковалев, Ковалева, 2023).

Таким образом, на осушенных почвах формируются благоприятные условия для выращивания сельскохозяйственных культур, особенно зерновых.

Вызовы современности.

Быстрыми темпами развиваются технологии осушительных мелиораций почв – по мере развития сферы строительства постоянно появляются новые требующие апробации материалы, в осушение почв привносятся приемы из городского строительства, появляются новые технологии и материалы в дорожном строительстве (Kovalev, Kovaleva, 2019). Новые вызовы 2023 г. для городской ливневой канализации в г. Москве оказались связаны с использованием технологий укладки дорожных одежд на тротуарах, продукты растворения которых попадают в ливневую городскую канализацию. Нередко объектами осушения наравне с почвами газонов и парков выступают малоэтажные архитектурные формы (дома, бани, гаражи, бассейны, беседки и т.д.). Два соседних участка одинаково небольшой площади могут коренным образом отличаться по стоимости и конструкции дренажа, тиражируемого для всех усадеб поселка в соответствии с одним и тем же СНиПом. Это связано, во-первых, с архитектурным решением фундамента дома, во-вторых, с использованием разного грунта и технологий его укладки на поверхности участка, а значит, с различной структурой внутрипочвенного стока, величинами фильтрации и неодинаковым количеством ярусов верховодки (Ковалева, Ковалев, 2023).

Каковы механизмы и закономерности движения внутрипочвенной влаги в нарушенных почво-грунтах? Решение этих вопросов, безусловно, лежит в плоскости инженерного почвоведения. И именно от ответов на них зависит эффективность осушительных систем, появление новых технологий строительства домов, сооружений и инженерных коммуникаций, конструкции спортивных сооружений. Дело в том, что пазухи котлованов зданий и сооружений, траншеи коммуникационных трасс имеют обратную засыпку из местного грунта. Даже тщательная послойная утрамбовка этих засыпок не исключает формирования «водных мешков» в трещинах набухания-усадки. Этот факт в совокупности с различным содержанием глинистых минералов в покровных и моренных суглинках приводит к развитию явлений набухания, деформациям отмостки и отделочных конструкций цоколей и фасадов зданий. Использование же грунтов с более высокими значениями коэффициента фильтрации (песок или щебень) усиливает эффект накопления инфильтрационных вод при отсутствии дренажной системы. В

свою очередь, засыпка дренажных траншей местным грунтом резко снижает гидравлическую связь трубы с поверхностными слоями почвы.

Существенно нарушена структура почвенного покрова селитебных территорий, и, следовательно, изменена гидрология ландшафтов: это связано с различной зарегулированностью поверхностного и внутрисочвенного стоков фундаментами зданий, ландшафтных сооружений и заборов, комплексом ландшафтных форм. Необходимо совершенствовать методику расчета междренних расстояний для этих новых ландшафтных условий плотно зарегулированного стока, высокой насыщенности дренажных и оросительных систем (на каждом участке), с различной нагрузкой на дренажные системы, которые совмещаются с ливневым стоком, со стоком из септиков и бассейнов, с разным планом посадок древесных пород и необходимостью герметизации дрен, а также разработкой приемов устройства дренажа вблизи древесных и кустарниковых растений (Ковалева, Ковалев, 2023). В последнем случае используется герметизация дрен полиэтиленом, засыпка траншей шлаком, содержащим медный колчедан, обработка траншей антисептиками, увеличение глубины закладки дренажа и увеличения уклонов дрен, использование объемных фильтров из кокосового волокна. Строительство выборочных несоординированных друг с другом выполненных без учета норм осушения частных осушительных систем вызывает колоссальный осушающий эффект, распространяющийся на окружающую территорию, и приводит к загрязнению водоприемников дренажным стоком, насыщенным выносимыми из осушенного ландшафта соединениями (Ковалев, 2001, 2021).

Появление новых изоляционно-фильтрующих полимерных материалов (тефонд, дренаиз, энкандрайн, пордрен, унидрен и др.) ставит новые вопросы по оценке эффективности их действия. СНИПов по их применению нет, как нет и исследовательских работ по анализу их поведения в разных типах почв. Это новое направление в сегодняшней практике осушения и в исследованиях траншейных засыпок и процессов установления гидравлической связи поверхностных слоев почв с дренажными трубами. Существенно изменились и сроки проведения дренажных работ, которые теперь выполняются круглогодично (Ковалева, Ковалев, 2023).

Таким образом, становление в рамках экологического почвоведения учения об антропогенно измененных почвах, с одной стороны, и экологического инжиниринга, с другой, а также инженерные системы и инженерные свойства самой почвы определяют теоретическую базу и возможность выделения в рамках почвоведения такого направления, как инженерное почвоведение (Ковалева, Ковалев, 2023). И тогда мелиорация (от лат. melio – это система мероприятий по улучшению свойств и режимов почв), в частности осушение минеральных заболоченных почв с помощью современных видов дренажа формирует новые агроэкологические условия почв, благоприятные для ведения сельскохозяйственного производства и гармоничного взаимодействия с окружающей природной средой.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23–24–00155, экспедиционные работы за прошедшие годы выполнены в рамках госзадания МГУ № 121040800146–3.

Литература

- Ковалев И. В. (2023) Fe-Mn конкреции как яркий диагностический критерий неосушенных и осушенных оглеенных минеральных почв // Проблемы и перспективы инновационного развития землепользования на мелиорированных землях: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, ВНИИМЗ. — Издательство Тверского государственного университета Тверь: С. 62–71.
- Ковалева Н.О., Ковалев И.В. (2023) Инженерное почвоведение и почвенно-ландшафтный инжиниринг: вызовы современности и перспективы развития. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение.* 78(4), 109–125.
- Ковалев И.В., Ковалева Н.О. (2023) Оценка эффективности осушения минеральных гидроморфных тяжелосуглинистых почв Средней полосы России разными видами дренажа // Материалы IV Международной научной конференции Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, 13–15 сентября 2023 г. СПб.: ФГБНУ АФИ Санкт-Петербург. С. 439–446.
- Zaidelman F.R., Kovalev I.V. (1998) Effect of drainage on the status and fabric of concretions in gray forest gleyed soils. *Eurasian Soil Science.* **31(9)**, 996–1004.
- Kovalev I.V. (2021) Drained soils as an analogue of a large-area lysimeter. *Moscow University Soil Science Bulletin* **76(3)**, 138–147. DOI: 10.3103/S0147687421030054.
- Kovalev I.V., Kovaleva N.O. (2019) Evaluation of the effect of modern drainage technologies on the physical properties and productivity of mineral hydromorphic soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **368(1)**, 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/368/1/012024.

УДК 634.8

ПОЧВЕННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ КАК ОСНОВА АМПЕЛОПЕДОЛОГИИ (НА ПРИМЕРЕ ВИНОГРАДНИКОВ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ)

Ковалева Н.О., Очирова Д.Д.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

natalia_kovaleva@mail.ru

Аннотация: В статье представлены результаты сравнительного анализа терруаров виноделия Краснодарского края – полуострова Абрау-Дюрсо и Таманского полуострова. Почвенный покров изученных ландшафтов представлен дерново-карбонатными и дерново-глеевыми почвами, которые обладают щелочной реакцией среды, засолением и невысоким плодородием, но имеют оптимальные почвенно-физические свойства: температуру, агрономически ценную водопропрочную структуру, достаточную обеспеченность влагой, хороший естественный дренаж, значительную скелетность.

SOIL-PHYSICAL FACTORS AS THE BASIS OF AMPELOPEDOLOGY (BASED ON THE EXAMPLE OF VINEYARDS OF THE KRASNODAR REGION)

Kovaleva N.O., Ochirova D.D.

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: The article presents the results of a comparative analysis of winemaking terroirs in the Krasnodar Territory - the Abrau-Durso Peninsula and the Taman Peninsula. The soil cover of the studied landscapes is represented by Rendzic Leptosols, which have an alkaline reaction, low salinity and low fertility, but have optimal soil-physical properties: temperature, agronomically valuable structure, sufficient moisture supply, good natural drainage.

Введение

Принятый в 2019 г. правительством Российской Федерации закон, направленный на увеличение площадей виноградников в России и улучшение качества продукции виноградарства, которая должна обладать системой защиты по географическому признаку, привел к бурному развитию виноградарства на небольших личных землевладениях в разных уголках России и возникновению разнообразных небольших виноделен с собственными терруарами. Продукт, выполненный из сырья, выращенного в определенной местности в контролируемых условиях, называется терруарным продуктом. Терруар (от французского *terroir*) – это совокупность почвенно-климатических факторов и особенных характеристик местности, таких как рельеф, роза ветров, наличие водоёмов, лесных массивов,

инсоляция, окружающий животный и растительный мир, определяющая сортовые характеристики сельскохозяйственной продукции, чаще всего — вина, кофе, чая, оливкового масла. Изначально понятие терруара возникло в виноделии, где под терруаром понимают совокупность условий одного определённого участка (для виноградников по традиции используют название «апеллясьон» от французского *appellation d'origine contrôlée* - контроль подлинности происхождения). Широко используется также термин «вкус терруара» или «вкус места» (от французского *gout de terroir*) для описания индивидуальных органолептических свойств и оттенков вина, которые обеспечивает непосредственно почва, на которой растёт лоза. Так, например, белые вина с верховьев Луары имеют в букете аромат кремня, так как виноградники расположены на кремнистых склонах (Вино, 2005). Считается, что географический фактор или дактилоскопический отпечаток вина (geographical “fingerprint” of wine) определяется семью основными факторами, включающими влагообеспеченность, условия минерального питания, уклон и экспозицию склона, оценку опасности заморозков, и пр. (Лисецкий, 2022).

Однако, не любой земельный участок может стать терруаром для виноградника. Виноград относится к засухоустойчивым субтропическим растениям с очень глубокой корневой системой, пронизывающей не только толщу почвы, но уходящей глубоко в почвообразующую породу. Оптимальной суммой осадков для него является 700-800 мм. Биологическим температурным нулем для винограда служит температура воздуха + 10⁰С и температура почвы на глубине 30-40 см около 8-9⁰С. Оптимальной суммой активных температур в период между распусканием почек и физиологической зрелостью ягод является величина 2200-4500⁰С. По данным Канадского института экологии и виноградарства (Luo et.al., 2022) устойчивая зависимость между составом почвы и качеством винограда и параметрами вина отсутствует, хотя традиционно считалось, что именно почва является основой терруара. Отечественные исследователи (Акимцев, 1950) в свою очередь показали, что на физиологические и биохимические процессы в виноградной лозе влияют главным образом физические свойства почв: температура, содержание влаги, гранулометрический состав почв, размер агрегатов, физико-химические особенности почвообразующей породы. Например, для легких столовых шампанских вин лучше всего подходят щебнистые перегнойно-карбонатные почвы, а для красных вин — глинистые почвы с высоким содержанием железа.

Именно с гранулометрическим составом почв тесно связаны такие характеристики как скорость инфильтрации влаги (должна быть от 500 мм в сутки), общая доступность воды в корневой зоне (от 150 мм при легкодоступной — от 75 мм). В конечном счете именно водный баланс почвы и лозы определяют качество вина для каждого конкретного терруара. Но в условиях меняющегося климата для многолетних насаждений виноградников обеспечение оптимальной влажности почв

– это задача, требующая постоянного контроля за потенциалом почвенной влаги. При этом нужно учитывать, что сила всасывания корней виноградной лозы охватывает толщу до 10 м (Vamberger, 2008).

Проблема выбора и подготовки почв под виноградники осложняется тем, что существует обратная зависимость между плодородием почв и качеством вина. На засушливых бедных почвах получают качественное вино с утонченным букетом и вкусом, а плодородные, обеспеченные влагой почвы дают большую биомассу лозы и грубые вина низкого качества (Мельников, 2018).

Процесс зонирования ландшафтов и определения местоположения ампелозкотопов встречает ряд методологических вызовов. Агроэкологические параметры имеют значительное пространственное разнообразие, что требует методов пространственной интерполяции данных, собранных на удаленных метеостанциях. Каждый сорт при этом раскрывает свой биологический потенциал лишь при определенных почвенно-экологических оптимумах, в противном случае он дает некондиционный урожай, ухудшается качество вина и виноматериалов.

Однако развитие ампелопедологии (науки о почвах виноградников) в настоящее время явно отстает от запросов практики, исследования терруаров единичны (Лисецкий, 2022), не разработаны списки агроэкологических факторов для различных ландшафтов и регионов. Поэтому целью данной работы стал сравнительный анализ почвенно-физических и ампелозкологических факторов активно развивающихся ареалов виноградарства Краснодарского края – полуострова Абрау и Таманского полуострова.

Объекты и методы

Объектами исследования послужили интразональные дерново-карбонатные почвы Новороссийского района, а именно полуострова Абрау, а также дерново-карбонатные и дерновые-грунтово-глеевые почвы Таманского полуострова. В районе исследований расположены знаменитые винодельни Абрау-Дюрсо (Абрау), Мысхако (Новороссийск), Фанагория (Темрюк), Шато Тамань (Тамань), Скалистый берег (Анапа) и др. Природные условия районов исследования соответствуют характеристикам причерноморского округа Северо-Западной Кавказской горной провинции. Климат мягкий, теплый, среднегодовая температура воздуха $+11$ – $+12^{\circ}$. Продолжительность вегетационного периода составляет 197–224 дня, сумма активных температур – 3600 – 4000°C . При этом основным лимитирующим фактором для получения продукции виноградарства является количество атмосферных осадков: от 400 мм на Таманском полуострове до 600 мм в Новороссийске. Почвообразующими породами являются: флишевая свита верхнего мела, состоящая из плотных палево-серых мергельных глин, различной плотности мергелей или рыхлых и плитчатых известковых песчаников.

По современной классификации почв России дерново-карбонатные типичные почвы (рендзины) относятся к карболитозёмам тёмногумусовым, выщелоченные и оподзоленные подтипы дерново-карбонатных почв – к буроземам темногумусовым, а по классификации WRB - к Rendzic Leptosols – почвам, сформированным на плотном карбонатном элювии.

Методы исследования включали определение рН водной суспензии потенциометрически, определение содержания органического углерода (после фумигирования карбонатов кислотой) и азота с помощью сухого сжигания на элементном CNS-анализаторе, определение магнитной восприимчивости полевым каппаметром КТ-5, гранулометрического состава – методом Качинского, электропроводности в почвенных пастах, доведенных о нижнего предела пластичности, – прибором LandMapper – 03/04. Состав стабильных изотопов углерода определен на изотопном анализаторе Termo-Finnigan Delta V Plus после предварительного фумигирования карбонатов.

Все определения выполнены в трехкратной повторности, статистическая обработка результатов осуществлялась с использованием программ STATISTICA 20.

Результаты и обсуждение

Исследованные дерново-карбонатные почвы обладают незначительной мощностью профиля – около 50-60 см, из которых 20-30 см приходится на гумусовый горизонт, а на глубине 60 см залегает плотная порода. Нужно заметить, что верхний слой почв под виноградниками гомогенизирован в результате многолетней плантажной вспашки на глубину 25 см (таблица 1). Все нижележащие горизонты отличаются карбонатностью и нарастающей вниз по профилю скелетностью. Насаждения виноградной лозы на слабо- и среднескелетных почвах (частицы размером более 3 мм в количестве до 30 %) дают высокие урожаи хорошего качества (Лисецкий, 2022), так как щебнистость горных склонов обеспечивает хороший естественный дренаж несмотря на тяжелый гранулометрический состав аккумулятивной части профиля. Мелкий скелет в тяжелых почвах увеличивает коэффициент теплопроводности, улучшает воздухо- и водопроницаемость. Однако разложение мергель в процессе почвообразования приводит к повышению активных форм карбонатов. Крупный щебень и валуны затрудняют обработку почвы, поэтому из пахотного горизонта их удаляют.

Структура гумусового горизонта в дерново-карбонатных почвах полуострова Абрау агрономически ценная - мелкокомковатая и зернистая, иллювиального – ореховатая. Цвет гумусового горизонта – серый и светло-серый. Структура пахотного горизонта засоленных дерново-глеевых почв Таманского полуострова выражена хуже: глыбистая, крупно- и среднекомковатая.

Реакция среды почвенного раствора преимущественно близкая к нейтральной, слабо- и средне-щелочная. Все почвенные профили вскипают от карбонатов с

поверхности. Определение электропроводности методом паст, доведенных до нижнего предела пластичности, обнаруживает засоление средней степени и солончаков в почвах Таманского полуострова. Дерново-карбонатные почвы полуострова Абрау относятся к незасоленным или слабозасоленным, что связано с высоким содержанием карбонатов и иногда гипса в материнской горной породе.

С величинами электропроводности коррелируют (коэффициент корреляции > 0,60) значения магнитной восприимчивости, диагностирующие разную степень влагообеспеченности почв и улучшение дренажа в терруарах полуострова Абрау, а также застойное грунтовое увлажнение в почвах Тамани.

Таблица 1. Свойства дерново-карбонатных почв

Терруар	Горизонт, глубина, см	Цвет	pH	Ске летн ость %	Грануломе трический состав	Электро провод ность, мк/см	Магнитная восприимчивость (СГСМх10 ⁻⁶)
Темрюк	A 0-20	2,5 Y 5/3	7,39	25	П*	10557,0	3,47
	AB 20-40	2,5 Y 4/2	7,39	6	П	8558,1	5,22
	BC 40-60	2,5 Y 4/3	7,77	3	П	5769,6	6,59
Анапа	A 0-20	10YR 6/3	8,08	5	СС	552,7	29,47
	AB 20-40	10YR 5/3	8,25	5	СС	649,0	29,72
	BC 40-60	10YR 5/3	8,33	5	ТС	581,3	29,99
Абрау- Дюрсо	A 0-15	10YR 4/2	8,28	10	СС	334,7	2,33
	AB 15-30	10YR 6/3	8,30	35	СС	274,3	2,47
	BC 30-60	10YR 7/2	8,36	50	ТС	310,4	6,01
	C 60-80	10YR 8/2	8,38	100	ТС	556,2	1,00
Мысхако	A 0-25	10YR 4/1	8,12	40	ЛС	383,7	5,77
	B 20-40	10YR 6/3	8,13	50	СС	829,4	7,99
	BC 40-60	10YR 7/2	8,25	70	ТС	782,3	7,01
	C 60-80	10YR 8/2	8,35	100	ТС	987,5	1,00
Новоросси йск	A 0-20	10YR 4/1	8,08	5	СУ	1503,6	6,60
	AB 20-40	10YR 4/1	8,12	10	ЛС	1503,6	16,75
	BC 40-60	10YR 3/1	8,23	50	ЛС	832,7	1,00

*П – песок, СУ – супесь, ТС – тяжелый суглинок, СС – средний суглинок, ЛС – легкий суглинок.

Содержание гумуса в пахотном горизонте низкое (не более 2,8-3,1 %), обогащенность гумуса азотом средняя и низкая (таблица 2). Все исследуемые почвы не отличаются высоким плодородием в традиционном смысле слова, содержат карбонаты с поверхности и легкорастворимые соли – в нижней части профиля.

Лукьянов и др. (2015) отмечают, что урожайность виноградников Таманского полуострова составляет 90-120 ц/га и даже 200 ц/га, а виноградников Новороссийского района – 50-70 ц/га. Однако более высокое качество вин, более раннее созревание и высокие органолептические оценки имеет продукция Абрау-Дюрсо и Мысхако в Новороссийском районе. Действительно, при движении с Таманского полуострова в сторону города Новороссийска увеличивается количество атмосферного увлажнения и уменьшение величин изотопного отношения углерода вплоть до -38 ‰ на фоне улучшающегося дренажа на склонах Кавказа. При этом уменьшается степень засоления почв. Таким образом, терруары полуострова Абрау-Дюрсо меняются в сторону более благоприятных по сравнению с Таманским полуостровом (таблица 3).

Таблица 2. Характеристика органического вещества дерново-карбонатных почв

Терруар	Горизонт, глубина, см	Гумус, %	N, %	C/N	$\delta^{13}\text{C}$, ‰
Абрау-Дюрсо	A 0-15	2,78	0,2	9,4	-38,22
	AB 15-30	1,22	0,1	7,9	-25,35
	BC 30-60	1,91	0,1	9,7	-25,80
Мысхако	A 0-20	3,13	0,2	11,1	-26,53
	AB 20-40	2,78	0,2	10,8	-25,60
	BC 40-60	1,20	0,1	8,0	-25,32

Таблица 3. Сравнение ампелозологии объектов исследования

Параметр терруара	Полуостров Абрау	Таманский полуостров
Осадки, мм	600	400
Сумма активных температур, °C	>4000	3400-3600
Вегетационный период, дни	197	224
Рельеф	Низкогорный, склоновый	Предгорный, холмистый
Грунтовые воды	Отсутствуют	Близкое залегание
Почвообразующая порода	Мергель, известняк	Карбонатные суглинки, песчаники
Почвы	Дерново-карбонатные	Дерново-карбонатные Дерновые грунтово-глеевые
Тип засоления грунтовых вод	Отсутствует	Хлоридно-сульфатный
Скелетность почв и пород	Высокая	Незначительная
Структура пахотного горизонта	Мелкокомковатый, зернистый	Крупно- и среднекомковатый, глыбистый

Выводы

1. Анализ литературы обнаружил, что развивающееся направление апмелозкологии остро нуждается в локальных и региональных генетических исследованиях почва виноградников.
2. Сравнение терруаров Таманского полуострова и полуострова Абрау-Дюрсо выявило явные преимущества терруаров виноградников Абрау-Дюрсо и Мысхако, так как последние обладают лучшими условиями естественного дренажа, лучшей обеспеченностью атмосферными осадками, меньшей засоленностью почв, оптимальной скелетностью отложений, лучшим химическим составом почв и пород.
3. Почвенно-физические особенности терруаров под виноградной лозой - это обязательное присутствие мелкого щебня, рыхлость и оструктуренность, наличие агрономически ценных агрегатов, высокая водопрочность структуры, отсутствие промерзания.
4. Анализ физико-химических свойств обнаружил, что для высоких урожаев винограда необходима достаточная и избыточная влажность почв, а для оригинального букета - недостаток влаги, слабо- и среднещелочная реакция среды, невысокое содержание гумуса и, особенно, азота в почвах.
5. К ампелопедологическим особенностям районов полуострова Абрау и Таманского полуострова можно отнести теплые зимы, розу ветров с преобладанием южных румбов, южную инсоляцию горных склонов, морские аэрозоли, карбонатные почвообразующие породы, обеспечивающие слабое и среднее засоление нижней части профиля.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ (№ 122011800459-3).

Литература

- Акимцев В.В. (1950) Почвы и качество вин. *Почвоведени.*, **5**, 296-302.
- Вино. Иллюстрированный справочник. (2005) У. Г. Крочи, Р. Кноль, С. Румрих, У. Швайцер, И. Свобода. — М: Бертельсманн Медиа Москау, 63-78.
- Лисецкий Б.Ф. , Зеленская Е.Я. (2022) Ампелопедологические особенности географических районов виноградарства Крыма. *Почвоведение*, **12**, 1540-1556.
- Лукиянов А.А., Антоненко М.В., Гапоненко Ю.В., Гонтаренко Е.Н. (2015) Характеристика некоторых аспектов продукционного потенциала дерново-карбонатных почв Краснодарского края. *Научный журнал КубГАУ*, **112(08)**, 1-12.
- Мельников В.А. Оценка агроэкологических условий Западной части Южного берега Крыма с выделением микрозон для оптимального размещения технических

сортов винограда. Автореферат на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук. 2018. 25.

Bamberger U. (2008) Wasserdefizit in Boden – Folgen für den Wein? *Deutsches Weinbaujahrbuch*. Verlag Ulmer, Stuttgart. 130-133.

Luo C, Zhang X., Meng X. (2022) Regional mapping of soil organic matter content using multitemporal synthetic Landsat 8 images in Google Earth Engine. *Catena*, **209**, 1.105842.

УДК 551.579

ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ГРАНИЧНОГО УСЛОВИЯ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

Кожунов А.В.¹

¹РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация,
avkozhunov@mail.ru

THE INFLUENCE OF ATMOSPHERIC BOUNDARY CONDITION DISCRETENESS ON THE ACCURACY OF CALCULATING SOIL MOISTURE

Kozhunov A.V.

RGAU - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation,

Annotation: A comparison was made of statistical coefficients describing the magnitude and nature of the discrepancies between the measured/interpolated and calculated volumetric soil moisture - root mean square error (RMSE), residual mass coefficient (CRM) and model efficiency factor (EF) when entering into the HYDRUS-1D model daily, average decadal and average monthly meteorological parameters for a 2-year and 1-year period, measured by the departmental weather station Tver and the automatic weather station ATMOS 41, located at the agroecological site of the All-Russia Research Institute of Reclaimed Lands, as well as groundwater levels for the entire modeling period.

Введение

Изучение процессов, влияющих на пространственное и временное распределение влажности почвы, является актуальным (Martinez et al., 2008), в том числе учитывая структуру почвенного покрова и влияние влажности на гидрофизические и теплофизические свойства почв (Трофимов и др., 2013; Болотов и др., 2010; Болотов, 2003; Мазиров и др., 2003; Трофимов и др., 2014) При моделировании влажности почвы в различных слоях почвенного профиля и изменения влажности почвы во времени необходимо учитывать влияние на неё метеорологических параметров. Ввод в модель влагопереноса в почве значений метеопараметров, измеренных на соседних метеостанциях, даже расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, может существенно повлиять на итоговые значения расчетной влажности почвы и, как следствие, на точность моделирования динамики влажности почвы. Особенно это актуально для верхней части почвенного профиля, поскольку верхние горизонты почвы в наибольшей степени подвержены влиянию динамично меняющихся погодных условий.

Кроме того, на величину расчетной влажности почвы должен влиять период осреднения вводимых в модель метеорологических параметров. С теоретической

точки зрения, осреднение измеренных величин метеорологических элементов должно приводить к ухудшению точности моделирования переноса влаги и распределения влажности в почве, что должно отражаться в виде роста ошибок расчетной влажности почвы в сравнении с измеренной влажностью почвы.

Цель и задачи исследования

Цель данного исследования – оценить изменение величины и характера расхождений между измеренной / интерполированной и расчетной объёмной влажностью почвы за 2-летний и 1-летний периоды на глубинах 10–100 см при вводе в модель HYDRUS-1D метеопараметров, измеренных двумя метеостанциями – ведомственной метеостанцией Тверь и расположенной в 4 км от неё автоматической метеостанцией ATMOS 41, и имеющих различный период осреднения – за сутки, декаду и месяц – при условии ввода в HYDRUS-1D значений уровня грунтовых вод за весь период моделирования.

Задачи исследования:

1) Оценить изменение статистических коэффициентов – среднеквадратической ошибки (RMSE) модели и коэффициента остаточной массы (CRM), отражающих величину и характер расхождений между измеренной / интерполированной и расчетной объёмной влажностью почвы, а также коэффициент эффективности модели (EF) влагопереноса в почве, при вводе в модель HYDRUS-1D значений уровня грунтовых вод за весь расчетный период и:

А) метеопараметрах с одной и той же метеостанции за 2-летний и 1-летний периоды моделирования, но имеющих различный период осреднения (суточные, декадные, месячные метеопараметры);

Б) метеопараметрах с двух метеостанций – ведомственной и автоматической – за 1-летний период, но имеющих одинаковый период осреднения.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является дерново-подзолистая рыхлопесчаная почва, расположенная в зоне избыточного увлажнения, в центральной части агроэкологического полигона Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель (ВНИИМЗ) в пос. Эммаусс Тверской области (Шеин и др., 2022).

В данной работе исследуются величина и характер расхождений между фактической объёмной влажностью почвы, измеренной на глубинах 10–100 см датчиками влажности почвы, и объёмной влажностью почвы, рассчитанной с помощью прогнозной модели HYDRUS-1D при условии переменного напора на нижней границе почвенного профиля, а также коэффициент эффективности модели влагопереноса в почве при вводе в модель метеопараметров, измеренных метеостанциями Тверь и ATMOS 41 и имеющих разный период осреднения

(суточные, декадные, месячные метеоданные). Периоды моделирования составляли 2 года (730 суток) и 1 год (точнее, 370 суток).

Модель HYDRUS-1D является одномерной конечно-элементной физически обоснованной прогнозной моделью, предназначенной для численного моделирования одномерного переноса воды, тепла и растворённых веществ в многофазных переменнно насыщенных пористых средах (Simunek et al., 2005; Смагин, 2012; Шеин, Рыжова, 2016).

Вблизи точки исследования влагопереноса в почве и распределения влажности почвы по глубинам была установлена автоматическая метеостанция ATMOS 41, а в самой точке исследования, из которой отбирались почвенные образцы, были также установлены датчики влажности почвы в пределах метрового слоя почвы через каждые 10 см. Влажность почвы определялась в дни измерения уровня грунтовых вод (УГВ).

Автоматическая метеостанция ATMOS 41 измеряет следующие метеорологические параметры с дискретностью 1 час: суммарная солнечная радиация (Вт/м^2), количество осадков (мм), максимальная интенсивность осадков (мм/ч), температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), атмосферное давление (кПа), относительная влажность воздуха (%), скорость ветра (м/с), направление ветра ($^{\circ}$), максимальный порыв ветра (м/с) (Pullman, 2018).

Параметры экспериментального обеспечения модели можно рассчитать, либо выбрав определённый текстурный класс почвы, либо задав процентное содержание фракций песка, пыли и глины в каждом слое почвенного профиля, т. е. гранулометрический состав, либо по данным о грансоставе и плотности каждого слоя почвы. Можно также ввести данные параметры вручную, если они были определены экспериментально (Смагин, 2012; Болотов и др., 2015; Бабошкина и др., 2016; Мади, Шеин, 2018).

В ходе исследования параметры экспериментального обеспечения модели, т. е. параметры функции ван Генухтена – Муалема и коэффициент фильтрации, были рассчитаны с помощью алгоритма искусственной нейронных сетей через педотрансферные функции (ПТФ) в программе RETC, встроенной в модель HYDRUS-1D. Для этого в программу RETC вводились процентное содержание песка, пыли и глины, а также плотность каждого из 11 слоёв почвы толщиной 10 см, образцы которой были отобраны в точке 4, находящейся в центральной части агрополигона ВНИИМЗ, и у этих образцов почвы были определены гранулометрический состав методом лазерной дифракции (Шеин и др., 2022), а также плотность. Программа RETC использует базу данных для ПТФ (Rosetta Lite v. 1.1). Гранулометрический состав и плотность слоёв почвы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Процентное содержание частиц глины, пыли и песка в профиле дерново-подзолистой рыхлопесчаной почвы в точке 4 (пос. Эммаусс, Тверская область). Гранулометрический состав почвенных частиц пересчитан в классификацию А. Аттерберга.

Глубина, см	Содержание гранулометрических частиц, %			Плотность, г/см ³
	<2 мкм (глина)	2–50 мкм (пыль)	50–1000 мкм (песок)	
0 – 10	4,8	42,9	52,3	1,34
10 – 20	4,7	40,3	55	1,32
20 – 30	4	39,2	56,8	1,38
30 – 40	2,3	35,7	62	1,35
40 – 50	1,7	18,6	79,7	1,27
50 – 60	4,1	31	64,9	1,31
60 – 70	4	31	65	1,35
70 – 80	3,4	31,2	65,4	1,41
80 – 90	3,4	31,2	65,4	1,38
90 – 100	3,2	32,7	64,1	1,39
100 – 110	3,4	34,1	62,5	1,39

Параметры ОГХ и коэффициент фильтрации (K_s) были рассчитаны программой RETC с помощью функции ван Генухтена – Муалема:

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha P_{k-c})^n)^m} + \theta_r; P_{k-c} < 0; m = 1 - 1/n$$

$$K_{в\lambda} = K_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2; m = 1 - 1/n; n > 1$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha P_{k-c})^n]^m}, P_{k-c} < 0; m = 1 - 1/n$$

где P_{k-c} – капиллярно-сорбционное давление почвенной влаги (кПа или гПа);
 θ_s – влажность полного насыщения. Близка к полной влагоёмкости почвы;
 θ_r – остаточная влажность почвы, соответствующая влажности точки перегиба в сорбционной области;

α – величина, обратная давлению барботирования (давлению входа воздуха) (1/кПа или 1/гПа);

n – крутизна кривой аппроксимации ОГХ, отражающая распределение пор по размерам;

K_s – коэффициент фильтрации (см/сут);

S_e – степень насыщения почвы влагой ($0 \leq S_e \leq 1$). (Шеин и др., 2001; Шеин, 2005).

Из географических параметров в модель HYDRUS-1D вводились географическая широта метеостанций Тверь ($56,88^\circ$) либо ATMOS 41 ($56,77^\circ$) и высота их над уровнем моря (146 и 143 м соответственно). Из метеорологических

параметров в HYDRUS-1D вводились: количество осадков в сантиметрах (суточное, декадное или месячное); облачность в баллах, если метеоданные вводились с метеостанции Тверь; суммарная солнечная радиация (в МДж/м²), если вводились метеоданные, измеренные автоматической метеостанцией ATMOS 41 (суточная, средняя за декаду или за месяц); максимальная и минимальная температуры воздуха (°C) и относительная влажность воздуха (%); скорость ветра на высоте её измерения в км/сут (Seina et al., 2022). При вводе метеопараметров по м/с Тверь высота измерения скорости ветра указывалась равной 1000 см, поскольку на метеостанциях наблюдательной сети Росгидромета данный метеопараметр измеряется на высоте 10–12 м над поверхностью земли. Когда вводились метеоданные с автоматической метеостанции ATMOS 41, высота измерения скорости ветра составляла 200 см, поскольку датчик скорости ветра у данной метеостанции расположен на высоте 2 м над поверхностью земли.

В качестве верхнего граничного условия в HYDRUS-1D было выбрано «Атмосферное граничное условие с поверхностным стоком». Данное условие предполагает, что часть выпавших осадков стекает по поверхности почвы (Seina et al., 2022). В качестве нижнего граничного условия (НГУ) было выбрано условие «Переменный напор». При данном граничном условии в HYDRUS-1D вводились значения уровня грунтовых вод. Недостающие значения УГВ были получены методом линейной интерполяции между измеренными значениями УГВ, поскольку предполагалось, что данный параметр меняется линейно.

Для сравнения величины и характера расхождения между фактической / интерполированной и расчетной влажностью почвы при различной дискретности метеопараметров были использованы значения объёмной влажности почвы на глубинах 10–100 см, измеренные по электронным датчикам влажности почвы в точке 4 агрополигона ВНИИМЗ, а также интерполированные значения объёмной влажности. Динамики влажности почвы сравнивались при использовании метеопараметров с м/с Тверь за 2 года (730 суток) – с 9 апреля 2021 г. по 8 апреля 2023 г. и за 1 год, точнее за 370 суток – с 1 августа 2022 г. по 5 августа 2023 г. При применении метеоданных с м/с ATMOS 41 динамики почвенной влажности сравнивались только за 370 суток.

При вводе в HYDRUS-1D ежесуточных метеоданных расчетная влажность почвы сравнивалась с фактической в дни измерения УГВ в точке 4 и с интерполированной (реже с фактической) в последние дни декад. При среднедекадных и среднемесечных метеоданных расчетная влажность сравнивалась с интерполированной влажностью в последние дни декад и месяцев. Поскольку большая часть данных о влажности почвы в последние дни декад и месяцев отсутствует ввиду того, что в эти дни в большинстве случаев не проводилось измерений по датчикам влажности почвы, эти данные были получены методом линейной интерполяции между измеренными значениями влажности почвы.

Для оценки влияния вводимых в модель метеоданных с метеостанций Тверь и ATMOS 41 – как суточных, так и осреднённых за декаду и за месяц – на точность моделирования динамики влажности почвы на глубинах 10–100 см были рассчитаны следующие статистические коэффициенты: **среднеквадратическая ошибка (RMSE)** модели, **коэффициент остаточной массы (CRM)**, отражающие соответственно величину и характер расхождения между измеренной/интерполированной и рассчитанной по модели влажностью почвы за период моделирования, а также **коэффициент эффективности модели (EF)**. Данные коэффициенты рассчитывались по формулам:

$$\text{RMSE} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{CRM} = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

$$\text{EF} = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2)}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

где P_i – расчетные значения объёмной влажности почвы, %;

O_i – измеренные / интерполированные значения объёмной влажности почвы, %;

\bar{O} – среднее значение объёмной влажности почвы, %, посчитанное из общего количества значений, выдаваемых моделью.

n – количество измеренных / интерполированных значений объёмной влажности почвы, которое выдаёт модель.

Оптимальные значения RMSE, CRM и EF равны 0, 0 и 1 соответственно. Положительные значения CRM означают, что модель занижает (недооценивает) фактические значения исследуемого параметра (Kolupaeva et al., 2022). Отрицательные значения CRM, наоборот, говорит о завышении (переоценке) моделью фактических значений искомого параметра.

Результаты исследования

При вводе в HYDRUS-1D суточных метеопараметров за 2-летний период по м/с Тверь ошибка модели (RMSE) оказалась выше в случае, если значения расчетной и фактической влажности почвы сравнивались в дни измерения УГВ, чем в случае, если эти значения сравнивались в последние дни декад. В обоих случаях наименьшие ошибки модели наблюдаются на глубине 20 см, наибольшие – на глубине 60 см. Коэффициент эффективности модели (EF) в первом случае выше на глубинах 60–90 см, во втором случае – на глубинах 10, 30–50 и 100 см. На глубине 20 см EF оказался одинаковым в обоих случаях. Значения CRM указывают на то, что на глубинах 10–90 см модель завышает измеренную влажность почвы, а на глубине 100 см – занижает её.

При изменении метеопараметров по м/с Тверь, заносимых в модель HYDRUS-1D, с ежесуточных на среднедекадные, а затем на среднемесячные (выходные данные модель выдаёт за последние дни декад и месяцев), RMSE возрастает на всех глубинах метрового слоя почвы, кроме 100 см, где RMSE, напротив, снижается. EF при этом снижается на всех глубинах, за исключением 100 см, где EF, наоборот, увеличивается. CRM на глубинах 10–90 см становится более отрицательным, что означает всё большее завышение моделью интерполированной влажности почвы при постепенном осреднении метеопараметров от суточных к среднемесячным. А на глубине 100 см CRM положителен и снижается, постепенно приближаясь к нулю. Это наряду со снижением RMSE указывает на приближение расчетных значений влажности почвы к интерполированным значениям. Наименьшие ошибки модели – на глубине 100 см, наибольшие – на глубине 60 см.

При использовании суточных метеопараметров за 370 суток по метеостанциям Тверь и ATMOS 41 и сравнении расчетной и измеренной влажности почвы в дни измерения УГВ RMSE оказалась выше на глубинах 10, 30–80 см при применении метеопараметров с м/с ATMOS 41, а на глубинах 20 и 100 см – при вводе в модель метеопараметров с м/с Тверь. На глубине 90 см RMSE одинакова независимо от того, данные по какой метеостанции вводятся в модель. Наибольшие ошибки модели – на 60 см, наименьшие – на 100 см. CRM немного более отрицательный на глубинах 10–50 см при использовании метеоданных с м/с ATMOS 41, чем с м/с Тверь, примерно одинаковые отрицательные значения CRM наблюдаются на 60 и 70 см, а на глубинах 80–100 см значения CRM совпадают при использовании метеоданных как с м/с Тверь, так и с м/с ATMOS 41 (на 100 см CRM положителен). На глубинах 10–90 см модель завышает измеренную влажность почвы, а на глубине 100 см – занижает её. EF ниже при применении метеоданных с м/с ATMOS 41 на глубинах 10–80 см, а на глубинах 90 и 100 см – при применении метеоданных с м/с Тверь.

При сохранении ежесуточных метеоданных, измеренных обеими метеостанциями за тот же период (370 суток), но при сравнении расчетной и измеренной влажности почвы в последние дни декад RMSE оказалась выше на глубинах 10 и 60–80 см при использовании метеоданных по м/с ATMOS 41, а на глубинах 20–50 и 100 см – выше при применении метеоданных по м/с Тверь. На глубине 90 см RMSE одинакова независимо от того, данные какой метеостанции вводились в HYDRUS-1D. CRM несколько более отрицателен на глубинах 10–40 см при вводе метеоданных с м/с ATMOS 41, примерно одинаковые отрицательные значения CRM наблюдаются на глубинах 50–70 см, тогда как на глубинах 80–100 см значения CRM совпадают при вводе в модель метеоданных с обеих метеостанций (на 100 см CRM положителен). На глубинах 10–90 см модель завышает измеренную влажность почвы, а на глубине 100 см – занижает. EF ниже при вводе метеоданных по м/с ATMOS 41 на глубинах 10 и 30–80 см, а на глубинах 90 и 100 см – ниже при

введении в модель метеоданных по м/с Тверь. На глубине 20 см EF одинаковый при вводе в HYDRUS-1D метеовеличин как с одной, так и с другой метеостанции.

При использовании среднедекадных метеопараметров за 1-летний период (37 декад; выходные данные модели за последние дни декад) RMSE выше для большинства глубин (10–80 см) при использовании метеовеличин с м/с Тверь. На глубине 90 см RMSE одинакова при применении метеопараметров как с м/с Тверь, так и с м/с ATMOS 41. И только на 100 см RMSE выше при вводе метеозначений с м/с ATMOS 41. CRM является более отрицательным на большинстве глубин (10–80 см) также при применении метеозначений с м/с Тверь, чем с м/с ATMOS 41. На глубинах 90 и 100 см значения CRM близки при использовании метеоданных с обеих метеостанций (на 100 см они положительны). Модель завышает интерполированную влажность почвы на глубинах 10–90 см, а занижает её на глубине 100 см. Коэффициент эффективности модели EF на глубинах 10–80 см оказался более низким также при применении метеоданных по м/с Тверь, а вот на глубинах 90 и 100 см, наоборот, - при вводе в HYDRUS-1D метеопараметров по м/с ATMOS 41.

Применение среднемесячных метеоданных за годовой период (выходные данные модели за последние дни месяцев) приводит к аналогичному результату – RMSE выше для абсолютного большинства глубин (10–90 см) при вводе метеоданных с м/с Тверь. Тогда как на глубине 100 см RMSE выше, если метеоданные вводились с м/с ATMOS 41. CRM более отрицателен уже на всех глубинах при вводе метеоданных из Твери, по сравнению с вводом метеоданных с м/с ATMOS 41. Таким образом, модель завышает интерполированную влажность на всех глубинах профиля почвы, хотя на глубине 100 см и несильно, поскольку CRM крайне слабоотрицателен. При вводе в HYDRUS-1D метеоданных по м/с ATMOS 41 CRM на глубине 100 см крайне слабopоложителен, практически равен нулю, поэтому расчетная влажность почвы теоретически должна почти совпадать с интерполированной. Однако ввиду наличия RMSE модель занижает влажность почвы. EF на глубинах 10–90 см более низкий также при использовании метеоданных по м/с Тверь, а на глубине 100 см, наоборот, - при вводе в HYDRUS-1D метеопараметров по м/с ATMOS 41.

Сравнение статистических коэффициентов при осреднении суточных метеовеличин, измеренных метеостанцией Тверь, за декаду и далее за месяц в течение 1-летнего периода (выходные данные модели за последние дни декад и месяцев) показало, что при использовании среднедекадных метеоданных RMSE возрастает на глубинах 10–70 см и убывает на глубинах 80–100 см. На глубине 90 см при осреднении метеоданных за декаду ошибка модели снижается сильнее, чем при осреднении метеоданных за месяц. CRM становится более отрицательным на глубинах 10–90 см, что указывает на большее завышение моделью интерполированной влажности почвы. На глубине 100 см CRM, будучи положительным при суточных метеоданных, снижается, приближаясь к нулю при

среднедекадных метеоданных и становясь слабоотрицательным при среднемесячных метеоданных. Это указывает, с одной стороны, на занижение моделью значений интерполированной влажности почвы, а с другой стороны – на сближение значений расчетной и интерполированной влажности почвы и переход тенденции от недооценки к переоценке моделью величин интерполированной влажности. EF на глубинах 10–80 см снижается, тогда как на глубинах 90 и 100 см – повышается.

В результате сравнения тех же коэффициентов при аналогичном осреднении метеоданных, измеренных метеостанцией ATMOS 41 (выходные данные модели за последние дни декад и месяцев) выяснилось, что на глубинах 10–30 и 50–70 см RMSE возрастает. На глубине 40 см эта закономерность нарушается – осреднение метеоданных за декаду приводит к снижению ошибки модели, а осреднение их за месяц, напротив, приводит к заметному повышению RMSE, т. е. к росту различий между интерполированной и расчетной влажностью почвы. На глубинах 80–100 см осреднение метеоданных приводит к снижению RMSE, т. е. к снижению различий между влажностями почвы. CRM становится более отрицательным на всех глубинах до 90 см (т. е. модель сильнее завышает влажность почвы). И несмотря на снижение RMSE на глубинах 80 и 90 см, модель всё больше переоценивает интерполированную влажность по причине роста значений CRM. На глубине 100 см CRM положителен и приближается к нулю. Поэтому вкуче со снижением RMSE это свидетельствует о смене моделью тенденции от недооценки реальной влажности почвы к сближению значений расчетной и интерполированной влажности. EF на глубинах 10–70 см понижается при осреднении метеопараметров. На глубине 80 см данная закономерность нарушается: сначала EF возрастает при вводе в модель среднедекадных метеоданных, а затем вновь снижается при введении среднемесячных метеоданных. На глубинах 90 и 100 см EF возрастает при осреднении метеопараметров за больший промежуток времени.

Во всех вариантах моделирования влагопереноса в почве за 1-летний период наименьшие ошибки модели наблюдались на глубине 100 см, а наибольшие ошибки – на глубине 60 см.

Выводы

1. При применении суточных метеоданных за 2-летний период по м/с Тверь ошибка модели (RMSE) выше при сравнении расчетной и измеренной влажности почвы в дни измерения УГВ, чем при сравнении их в последние дни декад. Коэффициент эффективности модели (EF) в первом случае выше на глубинах 60–90 см, во втором случае – на глубинах 10, 30–50, 100 см. На глубине 20 см EF одинаковый в обоих случаях. На глубинах 10–90 см модель завышает измеренную влажность почвы, а на 100 см – занижает её.

2. При осреднении суточных метеопараметров по м/с Тверь за декаду, а затем за месяц, RMSE возрастает на всех глубинах, кроме 100 см, где RMSE, напротив, снижается. Коэффициент эффективности модели при этом снижается на всех глубинах, кроме 100 см, где EF, наоборот, увеличивается. CRM на глубинах 10–90 см становится более отрицательным, то есть модель HYDRUS-1D всё больше завышает интерполированную влажность почвы при осреднении метеопараметров. На глубине 100 см CRM положителен и снижается, постепенно приближаясь к нулю. Это наряду со снижением RMSE указывает на приближение расчетной влажности почвы к интерполированной влажности.

3. При использовании суточных метеоданных за 1-летний период по метеостанциям Тверь и ATMOS 41 и сравнении расчетной и измеренной влажности почвы в дни измерения УГВ RMSE оказалась выше на большинстве глубин при применении метеопараметров с м/с ATMOS 41, а при сравнении значений влажности почвы в последние дни декад – выше при применении метеоданных с м/с Тверь. На глубинах 10–90 см модель завышает измеренную влажность почвы, а на глубине 100 см – занижает её. EF ниже при использовании метеоданных с м/с ATMOS 41 на глубинах 10–80 см (или 10 и 30–80 см при оценке влажности почвы в последние дни декад; на глубине 20 см EF одинаковый при вводе в модель метеоданных с обеих метеостанций), а на глубинах 90 и 100 см – при вводе метеопараметров по м/с Тверь.

4. При вводе в модель среднедекадных метеоданных за 1-летний период RMSE выше для большинства глубин (10–80 см) при применении метеовеличин с м/с Тверь. На глубине 90 см RMSE одинакова при применении метеопараметров с обеих метеостанций. И лишь на 100 см RMSE выше при вводе метеоданных с м/с ATMOS 41. Модель завышает интерполированную влажность почвы на глубинах 10–90 см, а занижает её на глубине 100 см. EF на глубинах 10–80 см более низкий также при применении метеоданных по м/с Тверь, а на глубинах 90 и 100 см, наоборот, - при использовании метеоданных по м/с ATMOS 41.

5. Ввод в HYDRUS-1D среднемесячных метеовеличин за годовой период приводит к аналогичному результату – RMSE выше для абсолютного большинства глубин (10–90 см) при применении метеоданных с м/с Тверь. Тогда как на глубине 100 см RMSE выше при вводе метеопараметров по м/с ATMOS 41. Если вводятся метеоданные из Твери, модель завышает интерполированную влажность на всех глубинах, хотя на 100 см и несильно. При вводе метеоданных по м/с ATMOS 41 модель завышает интерполированную влажность почвы на абсолютном большинстве глубин (10–90 см). На глубине 100 см CRM практически равен нулю, поэтому расчетная влажность почвы теоретически должна почти совпадать с интерполированной. Однако из-за влияния RMSE модель занижает влажность почвы. EF на глубинах 10–90 см оказался ниже также при применении метеоданных по м/с Тверь, а на 100 см, наоборот, - при вводе метеопараметров по м/с ATMOS 41.

6. При осреднении метеопараметров, измеренных метеостанциями Тверь и ATMOS 41 в течение 1-летнего периода, за декаду и далее за месяц RMSE возрастает на глубинах 10–70 см и убывает на глубинах 80–100 см (на 40 см при вводе метеоданных по м/с ATMOS 41 ошибка модели убывает при среднедекадных данных и снова возрастает при среднемесячных данных). CRM становится более отрицательным на всех глубинах до 90 см, т. е. модель сильнее завышает интерполированную влажность почвы. На глубине 100 см CRM положителен и приближается к нулю (при месячных метеоданных с м/с ATMOS 41 CRM становится слабоотрицательным). Это, наряду со снижением RMSE, указывает на приближение расчетной влажности почвы к интерполированной влажности. EF на глубинах 10–80 см снижается (на 80 см при вводе среднедекадных метеоданных по ATMOS 41 EF сначала возрастает, а при вводе среднемесячных метеоданных – вновь снижается. На глубинах 90 и 100 см EF повышается с осреднением значений метеопараметров.

Литература

- Бабошкина С. В., Пузанов А. В., Ельчинонова О. А., Рождественская Т. А. (2016) Водно-физические свойства и моделирование процесса движения влаги в чернозёмах южных Канской межгорной котловины (бассейн Р. Чарыш, Северо-Западный Алтай). *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. **3(137)**, 47–54.
- Болотов А.Г. (2003) Теплофизическое состояние почв и совершенствование инструментальной базы для его исследований: Дис... канд. с.-х. наук. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 148 с.
- Болотов А.Г., Беховых Ю.В., Семенов Г.А. (2010) Определение теплофизических свойств капиллярно-пористых тел импульсным методом с использованием технологии визуального программирования/ *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. **6(68)**? 37–40.
- Болотов А.Г., Дубский С.Н., Шаталов А.Н., Шаталов А.Н., Бутырин И.Н. (2015) Моделирование основной гидрофизической характеристики черноземов Алтайского края/ *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. **2(124)**, 31–35.
- Мади А.И., Шеин Е.В. (2018) Насыщенная гидравлическая проводимость почв: экспериментальные определения и расчёт с помощью педотрансферных функций *Агрофизика*. **1**, 37–44.
- Мазиров М.А., Макарычев С.В., Болотов А.Г., Трофимов И.Т., Беховых Ю.В., Сизов Е.Г., Иванов А.Л., Лёвин А.А. (2003) Теплофизические свойства и режимы в антропогенно-нарушенных почвах / под ред. С.В. Макарычева, М.А. Мазирова. М.: “Химия в сельском хозяйстве”, 153 с.
- Смагин А.В. (2012) Теория и практика конструирования почв. М.: Издательство Московского университета, 544 с.

- Трофимов И.Т., Беховых Ю.В., Болотов А.Г., Сизов Е.Г. (2013) Физические свойства черноземов под хвойными лесополосами. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. **9**, 23–27.
- Трофимов И.Т., Беховых Ю.В., Болотов А.Г., Сизов Е.Г. (2014) Влияние лиственных лесных насаждений на физические свойства почв. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. **1(111)**, 034–039.
- Шейн Е.В. Курс физики почв: учебник. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
- Шейн Е.В., Архангельская Т.А., Гончаров В.М., Губер А.К., Початкова Т.Н., Сидорова М.А., Смагин А.В., Умарова А.Б. (2001) Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: методическое руководство / Под ред. Е.В. Шейна. М.: Изд-во МГУ, 200 с.
- Шейн Е.В., Иванов Д.А., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В. (2022) Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область) *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. **110**, 5–21. DOI: 10.19047/0136-1694-2022110-5-21.
- Шейн Е.В., Рыжова И.М. Математическое моделирование в почвоведении: Учебник. М.: «ИП Макарушев А.Б.», 2016. 377 с.
- Kolupaeva V.N., Kokoreva A.A., Belik A.A., Bolotov A.G., Glinushkin A.P. (2022) Modelling water and pesticide transport in soil with MACRO 5.2: calibration with lysimetric data. *Agriculture*. **12(4)**, 505–530. DOI: 10.3390/agriculture12040505.
- Martinez C., Hancock G.R., Kalma J.D., Wells T. (2008) Spatio-temporal distribution of near-surface and root zone soil moisture at the catchment scale. *Hydrological Processes*. **22**, Issue 14, 2699–2714. DOI: 10.1002/hyp.6869.
- Pullman H.C. ATMOS 41: User Manual. METER Group, Inc. USA 2365, WA 99163. 2018. P. 1–33.
- Seina M., Simunek J., van Genuchten M.Th. (2022) The HYDRUS Software Package for Simulating the One-, Two-, Three Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. User Manual. Version 5. PC-Progress, Prague, Czech Republic. 342 p.
- Simunek J., van Genuchten M.Th., Sejna M. (2005) The HUDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 3.0. Riverside: Department of Environmental Sciences University of California. 240 p.

УДК 684

ПЕРЕНОС ПЕСТИЦИДОВ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО СОДЕРЖАНИЯ ИХ В ПОЧВЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЧЕРНОЗЕМЕ ВЫЩЕЛОЧЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОГО ЛИЗИМЕТРИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Кокорева А.А.^{1,2}, Колупаева В.Н.², Славиогло В.Д.¹, Бибулатов С.А.¹

1 Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

2 ВНИИ Фитопатологии, МО, Б.Вяземы, Российская Федерация

Kokoreva.a@gmail.com

TRANSFER OF PESTICIDES AND ASSESSMENT OF THEIR RESIDUAL CONTENTS IN THE SOIL ACCORDING TO THE RESULTS OF FIELD STUDIES IN LEACHED CHERNOZEM AND LABORATORY LYSIMETRIC EXPERIMENT

Kokoreva A.A., Kolupaeva V.N., Slavioglo V.D., Bibulatov S.A.

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Kokoreva.a@gmail.com

Annotation: A study of pesticide residues in the soils of the south-eastern region of the Tula region of Russia was carried out. No residues of pesticides used in this growing season were found, however, residual amounts of prohibited organochlorine pesticides were present in quantities below standard values. The most interesting fact is the discovery of DDT and its metabolites in the spring. This indicates not only the durability of persistent and highly sorption pesticides, but also their removal from the soil at great depths. The conducted laboratory filtration experiment demonstrates the presence in the soil of preferential migration paths associated with the presence of large pores and cracks, which is not always taken into account in standardization.

Введение

Нормирование пестицидов вместе с определением их остаточных количеств в почве и сопредельных средах (поверхностные воды, донные осадки, грунтовые воды) необходимо для определения рисков для человека и нецелевых организмов (млекопитающие, птицы, водные организмы, дождевые черви и другие виды, под которым понимается). Как для гигиенической оценки, так и для экологической необходимо понимать механизмы передвижения пестицидов в почве. Существует обширный литературный материал на тему миграции пестицидов, собранный за время применения этих веществ. Классическими стали пример атразина и ДДТ. Атразин вызывал массовую гибель рыбы в реках в удаленности от мест его использования.. Применение ДДТ имело огромный ряд преимуществ для человека, но негативные последствия при его массовом применении и производстве стали тем толчком, который привел к исследованию вреда, наносимого пестицидами природным средам и организмам (DDT, 1996).

По результатам этой масштабной научной работы постепенно сложились представления о процессах, происходящих с пестицидами в почве. Выделены основные из них, которые принято разделять на физические, физико-химические и химические. Так, среди физических процессов наиболее значимыми являются: передвижение с почвенными водами с латеральными, нисходящими и восходящими потоками, поглощение корнями растений, передвижение с поверхностным стоком и частицами почвы в соответствии с рельефом поверхности ландшафта, испарение с поверхности почвы и другое. Среди химических процессов основными называют разложение пестицидов с течением времени, появление метаболитов, сорбция органическим веществом. На передвижение веществ с конвективными потоками будут влиять специфические почвенные явления, такие как диффузия, дисперсия (Сметник и др., 2005). Сорбция и разложение будут определяться температурой и степенью аэробности. С глубиной скорость разложения будет снижаться, а в грунтовых водах пестициды могут консервироваться (Колупаева, 2018). Повышение температуры, наоборот, будет увеличивать скорость разложения.

В настоящее время разработана система оценки опасности пестицидов. В нашей стране при экологическом контроле используют руководство (Аптикаев, 2023). При этом, опасность оценивается по отдельным показателям стойкости, подвижности, токсичности для живых организмов с присвоением класса опасности. Однако, в реальных условиях необходимо оценить риск с учетом особенностей поведения пестицида в конкретных условиях: почва, метеорологические условия, особенности применения вещества и другие (Аптикаев, 2023).

Для присвоения действующему веществу пестицида миграционного класса опасности используют лабораторные эксперименты по определению коэффициента сорбции его органическим веществом (K_{oc}), а также лабораторные колоночные эксперименты, в т. ч. с состаренными остатками. При этом, используют стандартные типы почв с строго определенным количеством гумуса, с несколькими вариантами гранулометрического состава (Environmental Risk of...2018). Необходимо отметить, что при определении миграционного показателя вредности при разработке ПДК пестицидов в почве используют чистый песок, что существенно отличает гигиеническую оценку от экологической (МО, 1982).

Полевые деляночные эксперименты используются реже, поскольку большая вариабельность результатов из-за неоднородности почвенных свойств и метеорологических причин (при экстраполяции на большую территорию) не всегда позволяет определить максимальный вынос вещества в грунтовые воды и наибольшую глубину миграции в конкретных условиях. В Европейском союзе рекомендовано проводить деляночные эксперименты в течение двух лет с отбором остаточных количеств пестицидов в строго оговоренные сроки в продолжении вегетационного сезона (Regulation, 2017). Это довольно длительный и весьма дорогой процесс, который оплачивается из средств производителей средств защиты

растений. Для ускорения и возможности просканировать весь спектр требующих регистрации веществ был разработан расчетный способ определения остаточных количеств в почвах и сопредельных средах. Такими инструментами расчета риска стали математические имитационные модели миграции (Belik, 2019). Они позволяют рассчитывать содержание пестицидов на различных глубинах почвы при учете фактора времени (обычно, ежедневно), основываясь на дифференциальных уравнениях, описывающих большую часть процессов, происходящих с веществом в дисперсных системах (Сметник и др., 2005). Приведенные выше процессы учитываются и описываются математически, но пользователь работает только с доступной и понятной программной оболочкой. Несмотря на внешнюю простоту использования, обширный ряд алгебраических и дифференциальных уравнений требует экспериментального обеспечения, а именно определения границ почвы, ее послойных свойств, ежедневных погодных условий (Шейн и др., 2009). И, в системе оценки риска, такие наборы создаются и используются для всех моделей миграции. Это позволяет стандартизировать оценку всеми специалистами и для всех моделей. В экологической среде установился следующий термин, описывающий такие наборы данных: стандартный сценарий (base scenario, (Dubus, 2002)) - это совокупность параметров почвенного экспериментального обеспечения, климатических условий также агроэкономические факторы, которые характеризуют определенный сельскохозяйственный регион. Стандартные сценарии позволяют сравнивать и анализировать результаты различных исследований на основе общих входных данных. Они созданы на основе реальных исследований и рекомендованы к использованию во всех математических моделях при процедуре оценки экологического риска пестицидов (Kokoreva, 2022). Для России используют 9 сценариев (Колупаева, 2022), с одновременной разработкой еще нескольких в соответствии с почвенно-климатическим зонированием. Если обнаружен риск вымывания пестицида в опасных количествах в грунтовые воды, то регистрирующий орган направляет препарат на обязательные полевые испытания в нескольких регионах (Аптикаев, 2023).

Однако, использование стандартных сценариев должно быть подкреплено исследованиями, показывающими точность расчета миграции моделями. Ошибки в прогнозе относительно полевых экспериментов возникают во многом из-за особенностей конкретных почв и земель, на которых проводятся исследования.

Многочисленные работы по исследованию миграции веществ в почвах (Умарова, 2011; Kokoreva, 2021) называют причиной быстрого появления токсикантов в грунтовых водах наличие в почве преимущественных путей миграции влаги. Пестициды, попадая на поверхность почвы, с ливневыми осадками выносятся по крупным порам и трещинам в нижние слои почвы. Там они могут значительно снизить скорость своего разложения (Колупаева, 2022).

Макропоры, составляющие всего несколько процентов от общей пористости почвы, по некоторым оценкам (Belik A.A., 2020), переносят более 90% воды и растворенных веществ. Изучение миграции воды и веществ по макропорам проводится с использованием различных меток (тепловая, визуальная с окрашиванием, а также используются соли) (Умарова, 2011).

Объекты и методы

Было исследовано содержание остаточных количеств пестицидов в черноземе в юго-восточной части Тульской области, и, с использованием соли-метки КВг, был оценен максимально возможный вынос токсикантов (миграционный потенциал веществ в почве) в сопредельные среды, с учетом явления преимущественного переноса.

Почвы участка изучаемых земель представляют собой чернозем выщелоченный различной степени смывости. Рельеф местности соответствует пологоволнистой равнине, исследуемый склон спускается к пойме реки Дон. Один из тальвегов на исследуемом сельскохозяйственном поле переходит в овраг, где обнаружен родник, впадающий в реку Дон.

Использованы классические методы определения физических и химических свойств почв. Менее традиционные методы поясняются ниже в тексте.

Результаты и обсуждение

Плотность почвы исследуемом участке увеличивается с глубиной от 1,25 г/см³ на поверхности до 1,44 г/см³ на 40 см. Однако, скорость фильтрации воды находится на уровне очень высоких / излишне высоких значений (от 1080 см/сут на поверхности до 280 см/сут на 40 см).

Содержание органического углерода колеблется от 4,62% на поверхности до 3,25% на глубине 80 см. Кривые, описывающие основную гидрофизическую характеристику, определенную методом равновесного центрифугирования, отличаются на отдельных глубинах в насыщенной части и практически не отличаются в сорбционной.

Образцы для исследования остаточных количеств пестицидов отбирались в 5 точках (через каждые 100 м) вдоль линии берега, где перепад высот вдоль линии отбора составил 5 м. Еще 5 точек заложены вдоль линии тальвега, переходящего в овраг (перепад высот до 7 м).

Также, отобран образец воды из родника и образцы растительного материала (зерновые и масличные культуры).

Для определения содержания пестицидов использован метод ГХ-хромато-масспектрометрия. Поскольку, не был известен вносимый состав из препаратов, тестирование проводилось на нескольких группах пестицидов. Современные пестициды обнаружены не были, что можно связать с концом

вегетационного сезона (время определилось их рекомендаций определения загрязнения почв пестицидами (МУ, 1985), а также глубиной отбора (верхние 0-5, 0-10 [ГОСТР 58595- 2019]. Однако, в трех точках вдоль реки Дон были обнаружены остатки ДДТ и его метаболитов в количестве, не превышающем 0,001 мкг/кг (при ПДК 100 мкг/кг), а также в воде родника 0,00001 мкг/л (при ПДК 100 мкг/л). Наиболее чувствительный вид - водные беспозвоночные и донные организмы - имеют показатель острой токсичности $LC_{50} = 2,7-5$ мкг/л). Таким образом, превышений по нормам остатков пестицидов на территории нет. Однако, наличие остатков старых, запрещенных к использованию в 1971 году, пестицидов в верхних слоях почвы говорит о возможных эрозионных процессах, но не объясняет вынос ДДТ с подземными водами. ДДТ весьма стойкий пестицид ($DT_{50}=6400$ суток), он может находиться в почве десятилетиями, и, несмотря на крайне высокую сорбционную активность ($K_{oc}=105000$), он обнаруживается в постоянном водотоке, пусть и крайне низком количестве. Помимо пестицидов, в почве, растениях и воде родника достоверно обнаружены (без количественного определения) несколько групп углеводов, фенолов и других загрязнителей, для которых не разработаны нормативы в объектах окружающей среды, но известно их токсичное действие на живые организмы. Это показывает необходимость изучения миграции пестицидов с преимущественными потоками, а также возможность заранее количественно изучить риск внесения наиболее опасных пестицидов.

Такой эксперимент был проведен с ином-меткой КВг в лабораторном лизиметрическом эксперименте. Для проведения лабораторного эксперимента по вымыванию соли КВг был отобран монолит высотой 40 см и диаметром 30 см с поверхности исследованного участка [МР 2609-82]. Макротомографическая съемка с помощью медицинского томографа Siemens SMATOM Perspective с разрешением съёмки 684 мкм показало неоднородное строение порового пространства монолита. До 20 см расположен рыхлый слой с разветвленным поровым пространством, который подвергся недавней пахоте. Четко видна граница подплужного слоя, где поры значительно сокращаются и их направление преимущественно вертикальное. Распределение пор по размерам показало, что более 40% пор (макропор, крупнее 1 мм) имеют размер около 2 мм, но присутствуют и трещины крупнее 10 мм (в пахотном слое).

На поверхность монолита были внесены три пестицидных препарата (в данной работе их миграция обсуждаться не будет) и соль КВг из расчета 100кг/га, доза, применяемая (Boesten 1999).

Полив производился из пульверизатора без напора ежедневно в 12 часов. Общее количество воды, внесенной на поверхность соответствовало вегетационной норме юго-восточной части Тульской области (487 мм). Весь объем воды разделен на 30 дней (МР 2609-82).

Монолит был установлен на подставку для отдельного сбора фильтрата с нижней границы образца. Дно монолита разделялось на 5 участков (центральный и 4 радиальных сектора). Сток собирался ежедневно перед внесение новой порции воды на верхнюю часть монолита. Из каждой порции фильтрата отбирались образцы для определения концентрации соли. Для исключения испарения, верхняя часть монолита была закрыта.

Необходимо отметить, что влажность монолита была сохранена на момент отбора и составила 27-35%. Поэтому сток в колбах появился только на пятый день эксперимента. Условно обозначим центральную часть монолита номером 5, остальные 1-4 расположенные ближе к краям секторальные участки. В первые дни сбора фильтрата, большая часть стока появлялась в центральной колбе 5. Постепенно сток стал появляться и в колбе сектора 4. Но на 10 день эксперимента сток стал появляться в колбе 3 и, затем, постепенно, его количество в данной части лизиметра стало превалировать над остальными. В колбах 1 и 2 сток был зафиксирован после 15го дня в количестве, не превышающем 4-7% от общего ежедневного стока.

Вынос несорбирующегося иона брома в отдельных участках монолита отличался, что было ожидаемо. Интересным кажется то, что формирование основного канала миграции было постепенным. Но, при этом, сравнительная актуальная концентрация вынесенных ионов была с некоторыми отклонениями достаточно одинаковой, закономерности выноса сохранялись. Так, общий вынос иона брома в 3, 4, 5 колбе был соответственно был 29.1%, 22.0%, 31.6%, вклад 1 и 2 колбы был менее 1%. Вынос иона калия был в этих участках монолита 2.1%, 1.0%, 1.3%, для участков 1 и 2 менее 0,1%. В данном случае, актуальным стал практически полный вынос перед формированием стабильного потока миграции (3), который формируется как стабильный после 10го дня эксперимента. До этого неустойчивые каналы (4 и 5) осуществляют вынос брома до 75%. Затем, стабильный 3й канал выносит уже не более 1/3, но постепенно. В реальных условиях это будет способствовать неординарной миграции по трещинам с обильными и ливневыми осадками в более долгосрочный период, соответствующий вегетационному и более сезонам.

Отмеченное ранее рыхлое сложение пахотного горизонта, вызванное недавней вспашкой, показанная на томографических снимках в виде хаотически расположенных поровых направлений, будет фактором, прерывающим срок функционирования данных каналов. Затем пути миграции будут формироваться вновь, при этом время формирования таких каналов рассматривается от нескольких лет (Умарова, 2011), что будет зависеть от грансостава, в первую очередь, и содержания органического вещества во вторую.

Ион калия практически полностью сорбировался органическим веществом чернозема. Его выход менее 1%, и хорошо соотносится с общим стоком. Некоторое

повышение выхода на на 8е сутки связано с обильным стоком больше, чем с другими причинами.

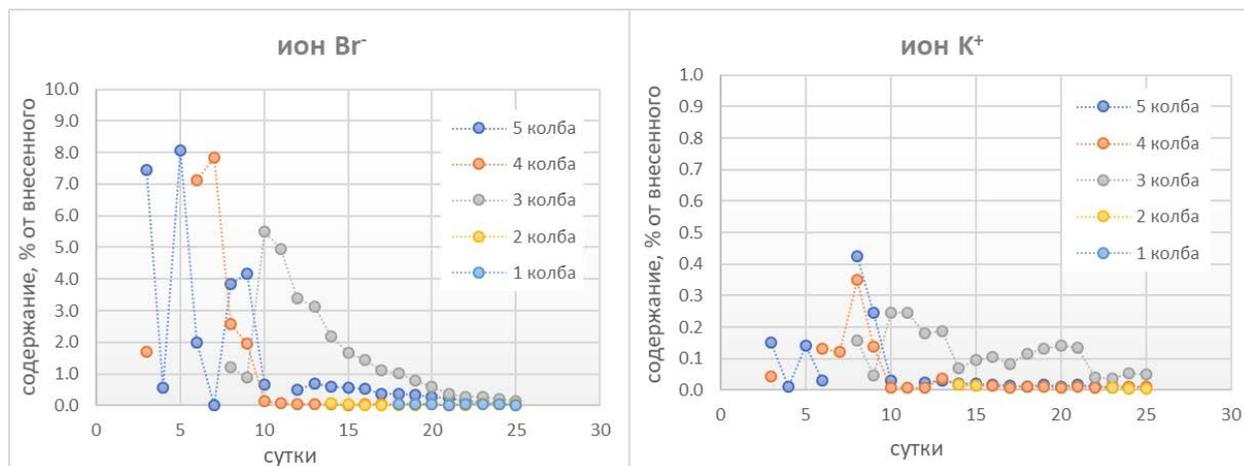


Рис.1 Процентное содержание вынесенных ионов калия и брома от общего количества (*шкалы имеют разный размер).

Таким образом, имеется картина неравномерного выноса воды и соли в пределах весьма небольшого по площади участка поверхности почвы. Это важно ввиду отбора почвенных образцов для исследования, когда выбирается точка, где фильтрация была минимальной и пестицид сохранился в верхнем пахотном слое, но в пробу не попадают участки с миграцией вещества в более глубокие слои. Кроме того, эти данные показывают, что после разрушения пахотой преимущественных каналов, со временем, они восстанавливаются. При этом, первое время могут работать несколько направлений миграции, но, со временем, поток стабилизируется, и большая часть ливневых осадков перемещается в небольшом объеме почвы со строго фиксированными участками.

Моделирование выноса соли KBr показало общие закономерности выноса ионов из почвы, но максимальные концентрации достигнуты не были. Предполагается использовать материал приведенного исследования для усовершенствования входных экспериментальных данных за счет калибровки модели.

Выводы

Проведено исследование остаточных количеств пестицидов в почвах земель юго-восточного региона Тульской области России. Не обнаружены остатки применяемых в данном вегетационном сезоне пестицидов, однако, присутствуют остаточные количества запрещённых хлорорганических пестицидов в количестве ниже нормативных значений (менее 0,1 мг/кг). Наиболее интересен факт

обнаружения ДДТ и его метаболитов в роднике, впадающем в реку Дон, что говорит об их выносе из почвы на большие глубины. Проведённый лабораторный фильтрационный эксперимент демонстрирует наличие в почве преимущественных путей миграции связанных с наличием крупных пор и трещин, что не всегда учитывается в процедуре нормирования, как гигиенического, так и экологического. Инструмент математического моделирования позволяет дополнить исследование количественными данными, полученными с использованием прогнозной экспозиции токсикантов.

Количественные характеристики, полученные в ходе эксперимента, будут использованы для калибровки модели PEARL и MACRO с целью применения инструмента математического моделирования для оценки риска применения пестицидов для почв и сопредельных сред в землях исследованного региона.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РНФ (проект РНФ № 23-64-10002 Интеллектуальный почвенный дизайн и композитные материалы для лесоразведения с регулируемой карбоновой секвестрацией)

Благодарность ООО “Центр экопестицидных исследований” за поддержку в исследованиях.

Литература

- DDT (1996) Extension Toxicology Network (EXTOXNET); Oregon State University: Corvallis, Oregon. <http://ace.orst.edu/info/extoxnet/pips/ddt.htm>.
- Сметник А.А., Спиридонов Ю.Я., Шеин Е.В. (2005) Миграция пестицидов в почвах место издания М.: РАСХН-ВНИИФ Москва, 336 с.
- Колупаева В.Н. (2018) Формирование перечня пестицидов для их мониторинга в грунтовых водах, стр. 94-95, 101-102.
- Аптикаев Р.С., Астайкина А.А., Горбатов В.С., Караванова Е.И., Кокорева А.А., Колупаева В.Н., Луганский С.Н., Маслов М.Н., Оганесова Е.В., Стрелецкий Р.А., Тихонов В.В. (2023) Экологическая оценка пестицидов : методические рекомендации издательство ООО "МАКС Пресс" (Москва) , ISBN 978-5-317-06937-7, 144 с.
- Environmental Risk of Pesticides March (2018) Current Trends in Biomedical Engineering & Biosciences 13(3) DOI:10.19080/CTBEB.2018.12.555862
- Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 concerning the placing of plant protection products on the market and repealing Council Directives 79/117/EEC and 91/414/EEC (Regulation 1107/2009). 24 November 2009. Retrieved 11 December 2017.

- Белик А.А. (2019) Миграция пестицида циантринилипрола в суглинистых почвах: экспериментальные исследования и математическое моделирование
Кандидатская диссертация по специальностям 06.01.03 - Агрофизика, 03.02.08 - Экология (по отраслям) (биол. науки)
- Шейн Е.В., Горбатов В.С., Кокорева А.А., Умарова А.Б., Колупаева В.Н., Перевертин К.А (2009) Оценка чувствительности, настройка и сравнение математических моделей миграции пестицидов в почве по данным лизиметрического эксперимента. *Почвоведение*, **7**, 824-833
- Dubus IG, Beulke S, Brown CD. (2002) Calibration of pesticide leaching models: critical review and guidance for reporting. *Pest Manag Sci.* Aug; **58(8)**:745-58.
- Kolupaeva Victoria, Kokoreva Anna, Belik Alexandra, Bolotov Andrei, Glinushkin Alexey (2022) Modelling Water and Pesticide Transport in Soil with MACRO 5.2: Calibration with Lysimetric Data. *AGRICULTURE-BASEL*, **12(4)**, 505-530
- Колупаева В.Н. (2022) Методы изучения миграции пестицидов: анализ, сравнение, рекомендации по использованию при оценке риска воздействия на грунтовые воды. *Биосфера*. **3**.
- Умарова А.Б. (2011) Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв место издания ГЕОС Москва, ISBN 978-5-89118-562-3, 269 с.
- Kokoreva A.A., Dembovetskiy A.V., Ezhelev Z.S., Bolotov A.G., Stepanenko V.M., Shishkin K.V., Abramyan I.A. (2021) Simulating water transport in porous media of urban soil. *Journal of Physics: Conference Series*, **862(1)**, 012042-012046
- Belik A.A., Kokoreva A.A., Bolotov A.G., Dembovetskii A.V., Kolupaeva V.N., Korost D.V., Khomyak A.N. (2020) Characterizing macropore of albic glossic retisol using computed tomography. *Open Agriculture*, **5(1)**, 1-10
- ГОСТР 58595-2019 "Почвы. Отбор проб" (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 октября 2019 г. N 954-ст).
- Методические указания по контролю уровней и изучению динамики содержания пестицидов в почве и растениях / Всесоюз. произв.-науч. об-ние по агрохим. обслуж. сел. хоз-ва "Союзсельхозхимия", Центр. ин-т агрохим. обслуж. сел. хоз-ва; [Разраб. М. И., Луневым и др.]. - Москва : Агропромиздат, 1985. - 58 с.; 20 см.
- Методические рекомендации по гигиеническому обоснованию ПДК химических веществ в почве (утв. Минздравом СССР 05.08.1982 N 2609-82) (вместе с "Временными методическими указаниями по применению расчетного метода обоснования ориентировочных допустимых концентраций (ОДК) пестицидов в почве", утв. Минздравом СССР 14.01.1981 N 2283-81)

Simulation of water flow and bromide transport in a water repellent sandy soil using a one-dimensional convection-dispersion model February 1999 *Journal of Hydrology* 215(1-4):172-187 DOI:10.1016/S0022-1694(98)00268-6

УДК 631.434

СЕЗОННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ЛЬДА В ПОРАХ ПОЧВ КРИОМЕТАМОРФИЧЕСКОГО ОТДЕЛА

Коркина Е.А.

ФГБОУ ВО "Нижевартовский государственный университет", Нижневартовск,
Российская Федерация
lenaknv@gmail.com

Korkina E.A.
Nizhnevartovsk State University

Annotation: Cryometamorphic soils not related to WRB to Cryosols, however, related to Cambisols are formed by permafrost processes and form ice in the structure. The findings suggest an endangered intergelisol in the southern boundary of the cryolithozone. The average annual temperatures for soils of the cryometamorphic department are positive: 1.94 °C for the north taiga subzone and 2.06 °C for the medium taiga subzone.

Введение

Образование льда в порах криометаморфических горизонтах является основным почвообразовательным явлением в таежных мерзлотных суглинистых почвах. Особенностью почв криометаморфического отдела является криогенная структура, морфологически выраженная в ооидных, угловато-крупитчатых и плитчатых (шлировых) формах агрегатов. Формированию криогенной структуры способствует сезонное промерзание суглинистых почв и повышенный гидроморфизм таёжной зоны Западно-Сибирской равнины. Несмотря на достаточно крупные ареалы распространения почв криометаморфического отдела представления о светлозёме, органо-криометаморфической почве появились не так давно с исследованиями И.П. Гавриловой и В.Д. Тонконогова (2004), где они обращали внимание на суглинистый гранулометрический состав почв, проявление тиксотропии, слабоконтрастную дифференциацию и слабую морфологическую выраженность элювиального горизонта. Ранее, в работах по исследованию почв бореальной зоны Западно-Сибирской равнины, а также на почвенных картах можно найти материалы по генезису, свойствам и пространственной дифференциации мерзлотно-таёжных почв, наряду с подзолистыми и элювиально-глеевыми, таёжно-поверхностно-глеевыми почвами, мерзлотно-таёжными оподзоленными почвами и глеезёмами оподзоленными (Долгова, 1972; Караваева, 1973; Хренов, 2002; Никитин, 2013).

Мерзлотные процессы влияют на гидротермические режимы в почвах и почвообразовательные процессы почв криометаморфического отдела. Промерзание почв — сложный физический и физико-химический процесс. По данным

Н.В. Тумель (2004) сезонномерзлый слой в пределах района исследований имеет глубину в суглинках от 1,4 до 2 м в зависимости от степени дренированности залесенных равнин. Образование льда-цемента происходит непосредственно в порах почв. В пылеватых суглинках, с переходом воды в лед без заметного ее перемещения, наблюдаются миграция влаги и ее последующее замерзание с образованием шлирового (сегрегационного) льда (Van Vliet-Lanoe, B., 1998). Особая роль сегрегационного льдообразования состоит в том, что именно с ним обычно связана пучинистость промерзающих дисперсных отложений.

Криопедогенез в почвах определяется в виде шлировости структурных отделенностей и партлювации твердых частиц в нижней части профиля криометаморфических почв, морозобойных клиньев и образовании языковатости в подзолах северотаёжной зоны, формировании ледяных линз в торфяных толщах. Эти и другие криогенные признаки могут также являться признаками реликтовых процессов криогенеза (Овчинников, 2009) и влиять на эволюционное развитие почв. Потепление климата и увеличение теплого периода, влияющего на прогревание криометаморфического горизонта, влияет на активизацию почвенных процессов и дифференциацию горизонтов криометаморфических почв, создает новые условия для посткриогенной стадии.

Объекты и методы

Объектами исследования послужили почвы криометаморфического отдела (светлозём и органо-криометаморфическая), сформированные на водораздельных возвышенностях таежной зоны Западно-Сибирской равнины: Северо-Сосьвинская возвышенность (п.г.т. Берёзово), Аганский увал с северной и южной экспозиции.

Зимнее морфологическое описание органо-криометаморфической почвы имеет следующее описание:

АО 0 – 10 см. Слегка мерзлый, межпоровое пространство растительных волокон и корней представлено кристаллами льда, буровато-коричневый, представлен мхами средней степени разложенности, пронизан ризоидами (80 %) и корнями кустарничковой растительности (20 %), хвоя слабой разложенности, остатки коры деревьев, веток, семена, угли, граница ровная, переход резкий по окраске и составу.

F 10 – 35 (40) см. Мерзлый; окраска неоднородная – пятнистая, светло-коричнево-охристая; плотный, пылеватый суглинок, за счет цементированья льдом, горизонт состоит из прочных округлых агрегатов, наблюдается горизонтальная делимость, заполненная льдом, очень много марганцевых и железистых конкреций в виде зерен, бобовин и охристых пятен; пронизан корнями древесной и кустарничковой растительности 20 %, граница ровная, переход заметный по окраске.

CRM 35 (40) – 50 см. Холодный; окраска основного горизонта однородная, цвет бежевый, фиксируются марганцевые новообразования в виде конкреций, реже

чем в верхнем горизонте, плотный, пылеватый суглинок, структура угловато-крупитчатая, икряная, при детальном разборе в структуре выделяется микроплитчатость с микропористостью, по трещинам видны тонкие силтаны, наполненные кремнезёмом.

Мезоморфологическую съемку в криометаморфическом горизонте производили с помощью цифрового микроскопа Hirox KH-7700 (Япония) с программным обеспечением, при следующих условиях: Lens MX (G) – 10 C: OL –35, а также под бинокляром МБС 15.

Гидротермические данные были получены с помощью системы автоматического мониторинга «САМ-НМ2». Системы фиксируют температуру и влажность грунта, высоту снежного покрова. Параллельно образцы из почвенных шурфов отбирались по генетическому принципу. В органических образцах изучалась влажность почв термостатно-весовым методом: высушивали при температуре 105 °С до постоянно-сухого состояния, после чего определяли объёмную массу воды и сухого вещества почвы. Нужно отметить, что влажность, определяемая «САМ-НМ2» дает точные значения для минеральных горизонтов, однако для органо-аккумулятивных горизонтов, значения относительные не выше 100 %, хотя известно, что гидрофильные растения, формирующие лесную подстилку, способны впитывать в себя воду до 800 %.

Результаты и обсуждение

Льдистость криометаморфических горизонтов, в настоящее время, проявляется сезонно. Ранее, до 2012 года кристаллы льда обнаруживались в криометаморфических горизонтах в летний период. В настоящее время лед в порах обнаруживается только в зимний период. Сезонные промерзания криометаморфических почв в северотаёжной подзоне достигают 60 см в глубину, в среднетаёжной подзоне – 40 см. По температурным данным для почв среднетаёжной зоны, минимальная температура на поверхности почв в 1991 году достигала – 37,1°С. При исследованиях температурного режима почв в пределах водоразделов Сосьвинского Приобья Н.М. Федорова (1970, 1972) отмечала наличие сезонной сухой мерзлоты в профиле суглинистых почв, а также сезонное промерзание и оттаивание верхних горизонтов, а также периодическое оттаивание нижней части профиля, с переходами температур в отрицательные показатели.

Лед в поровом пространстве зависит от способности почвы фильтровать воду и насыщать почвенный профиль водой. Период внутрипочвенного стока исследуемой территории короткий с мая по октябрь. Восемь месяцев почва находится под воздействием мерзлотных процессов. Несмотря на высокое атмосферное увлажнение, влагозапас почвы составляет 128 мм/год (Коркина и др. 2023). Неудовлетворительной фильтрацией в криометаморфических горизонтах и низкой водопроницаемостью влияет сложение, гранулометрический состав. Спецификой

криометаморфических почв остается отсутствие дренажа в автоморфных позициях на суглинистых отложениях.

Промерзание профиля и образование льда в органо-аккумулятивном горизонте светлосёма Северо-Сосьвинской возвышенности начинается в середине октября и заканчивается к апрелю (рис. 1).

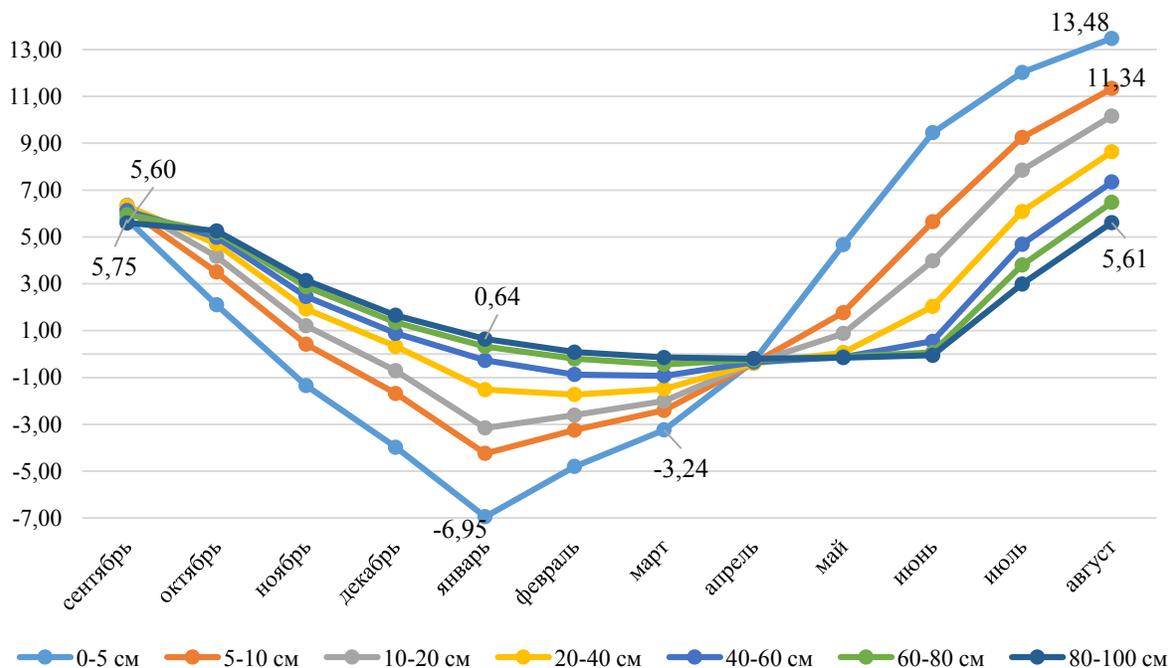


Рис. 1. Среднемесячные температуры светлосёма Северо-Сосьвинской возвышенности (п.г.т. Берёзово)

Максимальные отрицательные температуры составляют -7°C для органо-аккумулятивных горизонтов. Криометаморфический горизонт CRM на глубине 40-60 см имеет среднемесячную температуру января $-0,3^{\circ}\text{C}$, на глубине 80-100 см имеет максимально низкую температуру $0,64^{\circ}\text{C}$. Промерзание почвы, в исследуемые годы 2020-2023, составляло 60-80 см. Отрицательные температуры фиксируются до глубины 60 см. Образование льда в горизонтальных порах обнаруживалось в зимний период до границы промерзания почв.

Влажность криометаморфических горизонтов в течении года практически имеет стабильные значения около 23 % (табл. 1). Основное движение воды происходит в верхних органо-минеральных горизонтах (АО-Е-ВФ). К образованию льда в декабре влажность увеличивается до 41,1 % на глубине 30 - 40 см.

Таблица 1. Влажность светлосёма Северо-Сосьвинской возвышенности (п.г.т. Берёзово)

глубины, см	месяцы	
	июнь	декабрь
0-10	313,9	190,1
10-20	36,1	83,1
20-30	27,8	42,0
30-40	25,8	41,1
40-50	23,3	27,1
50-60	23,3	25,0
60-70	23,3	23,8
70-80	23,3	23,0
80-90	20,2	21,0

Температурный режим почв криометаморфического отдела северной подзоны от средней подзоны отличается на 1 °С. В северной подзоне суммарная температура почв составляет около 2°С, среднетаёжная подзона составляет около 3 °С.

В средней таёжной подзоне почвы криометаморфического отдела формируются на Аганском увале. Температуры южных и северных экспозиций различаются слабо (рис. 2, 3). Максимально отрицательная температура –3 °С фиксируется для органо-аккумулятивных горизонтов южной экспозиции увала и –3,7 °С для северной экспозиции. Самыми холодными температурами на глубине 80-100 м фиксировались температуры положительные 1,46 для южной экспозиции и 1,26 для северной экспозиции А

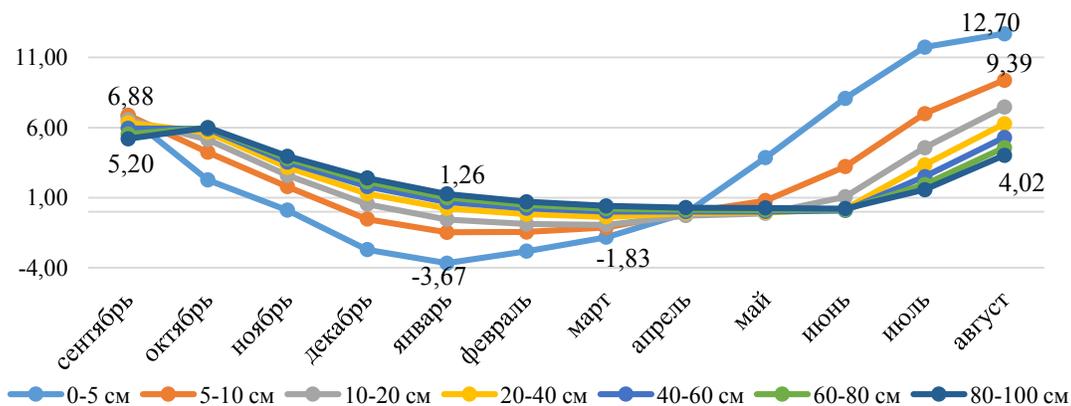


Рис. 2. Среднемесячные температуры органо-криометаморфической почвы северной экспозиции Аганского увала

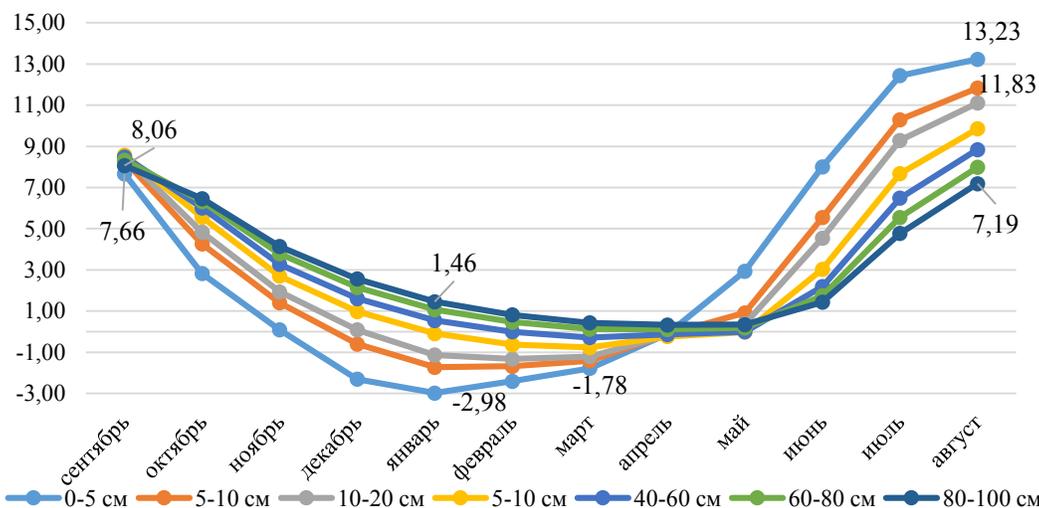


Рис. 3. Среднемесячные температуры светлосема иллювиально-железистого южной экспозиции Аганского увала

В исследуемых почвах фиксируется постепенное сезонное промерзание профиля. В ноябре промерзание составило 10 см, в декабре – 40 см, в январе – 70 см. Полное оттаивание профиля приходится на конец мая, начало июня, в этот период на температурный режим действует влага растаявшего снега и теплые дождевые осадки. Мощность снега в ноябре составила 25 см, в январе – 40 см, в марте – 60 см.

Таблица 2. Влажность светлосема иллювиально-железистого южной экспозиции Аганского увала

глубины, см	месяцы											
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
0-10	57,6	59,2	54,8	66,1	57,6	115,0	165,7	465,7	450,8	115,0	165,7	34,9
10-20	34,8	30,5	42,3	83,1	34,8	45,9	38,9	42,3	61,6	45,9	38,9	23,9
20-40	29,0	28,4	68,5	41,1	29,0	50,4	27,7	68,5	33,5	50,4	27,7	20,0
40-60	37,5	26,6	35,1	27,1	37,5	35,5	23,8	35,1	20,0	35,5	23,8	20,6
60-90	24,0	29,8	31,7	-	24,0	31,0	21,1	31,7	24,9	21,5	21,1	18,8

Промерзание и кристаллизация воды в почве является определяющими элементарными процессами в формировании криометаморфического горизонта. Замерзание слабоминерализованных почвенных растворов в деятельном слое начинается при температуре 0°C, возникает «нулевая завеса» (Каверин и др. 2016). На территории исследования для атмосферного воздуха переход через 0°C на отрицательные температуры происходит в середине октября, в этот же период наблюдается максимальная влажность воздуха – 85 % за счет выпадающих

атмосферных осадков в виде дождей. Постепенно происходит охлаждение поверхности, органо-аккумулятивного горизонта и накопление в нем влажности до 167 %. К ноябрю, почвенная влага фильтруется до горизонта ВF, достигая глубины 40 см, достигая максимальной влажности 68 %. Средние температуры воздуха ноября составляют -14°C , что влияет на образование в органической части светлосёма межпорового льда. В декабре, водные растворы из иллювиально-железистого горизонта движутся к фронту промерзания, образованному в грубогумусовом горизонте, влажность почвы на глубине 10–20 см увеличивается до 83 %, в иллювиально-железистом уменьшается до 41 %, горизонт E морфологически не выделяется. В этот же период профиль промерзает до глубины 40 см.

«Нулевые завесы» в профиле почв криометаморфического отдела имеют продолжительность пять месяцев. Переходы температуры через 0°C на глубине 20 см (горизонты АО–Е–ВF) отмечаются в период с середины ноября по начало мая. В этот период, как правило, устанавливаются стабильные морозы при температуре воздуха -30°C . Сумма положительных температур составляет 704°C , сумма отрицательных температур составляет -320°C . «Нулевая завеса» на глубине 40 см (горизонт CRM) устанавливается в начале февраля, достигая максимально низкую отрицательную температуру $-3,7^{\circ}\text{C}$, которая стабильно держится до начала апреля. Сумма положительных температур 719°C , сумма отрицательных температур составляет -142°C . «Нулевая завеса» на глубине 70 – 80 см имеет продолжительность 8 месяцев с ноября и по июнь. На данной глубине влажность достаточно стабильна, в среднем составляет 22 %. Сумма положительных температур для глубины 1 м составляет 504°C , сумма отрицательных температур -99°C . Таким образом, в криометаморфических горизонтах, согласно основам гляциологии, при замерзании влажных дисперсных грунтов образуется текстурно-образующий лёд (Скворцова и др., 2020), являющийся определяющим элементом формирования криометаморфического горизонта и криогенной структуры в виде слоистой текстуры, когда ледяные шпильки образуют взаимно параллельные линзообразные прослойки, чередующиеся со слоями частиц и минеральных агрегатов, связанных льдом-цементом (рис. 4).

Мезоморфологический анализ мерзлых образцов показал, что крупные поры (5–7 мм) образуются в деятельном слое, т.е. в горизонтах близких к поверхности. В криометаморфических горизонтах наблюдается тонкослоистость, тонкоплитчатость с образованием ледяных пор 0,1–0,5 мм. Слипание угловатых агрегатов происходит под действием льда. Во время промерзания происходит сепарация кремнистых присыпок в виде силтан и скелетан, что характеризует срединный горизонт CRM почв криометаморфического отдела.

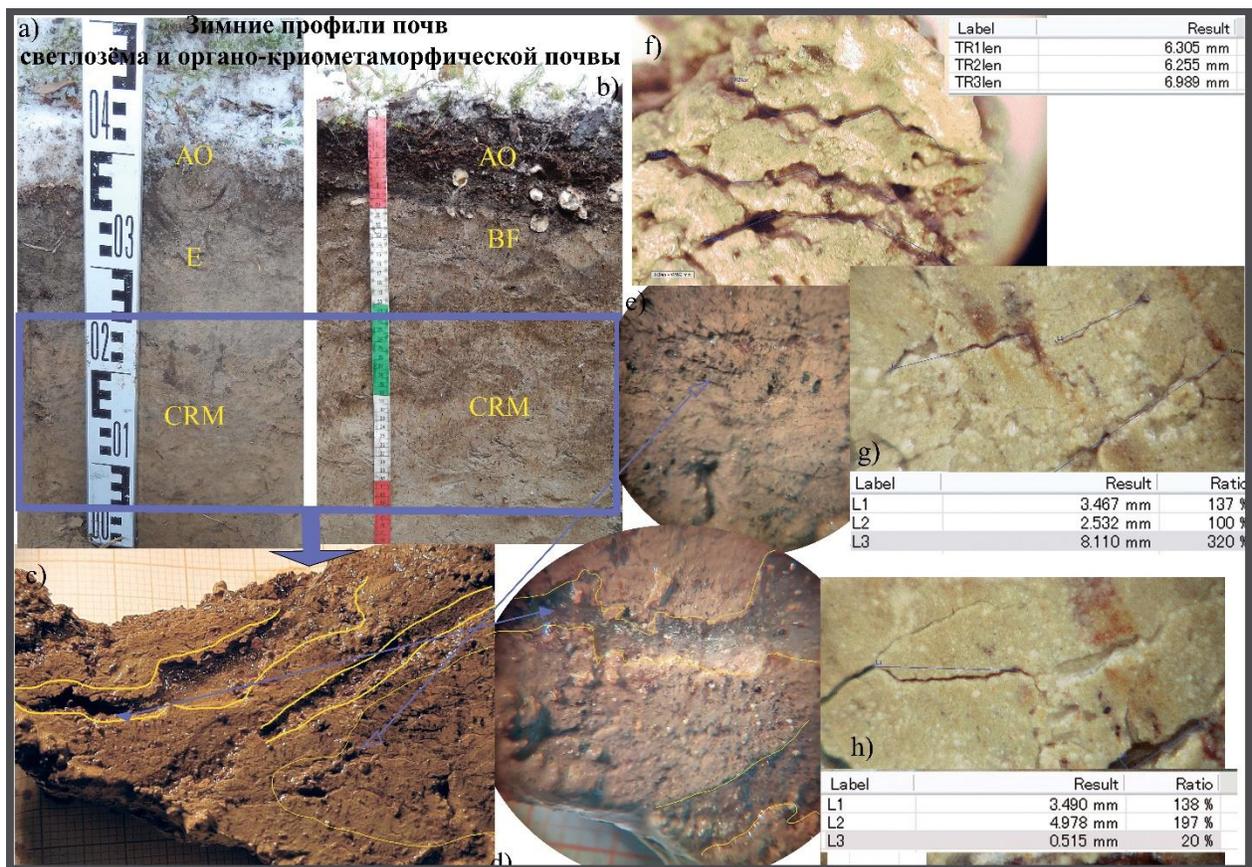


Рис. 4. Мезоморфологическая съёмка образцов почв криометаморфического отдела: а) светлосзем Северо-Сосьвинской возвышенности б) органо-криометаморфическая почва Аганского увала в) текстурно-образующий лёд в порах 0,5-0,7 см на глубине 30-40 см г) шпировая структура д) горизонтальная слоистость угловато-крупитчатых агрегатов е) тонкие горизонтальные поры заполненные льдом

Выводы

Температурные данные свидетельствуют об исчезающих мерзлотных "перелетках" в таежной зоне Западно-Сибирской равнины. Зафиксированы в профилях почв криометаморфического отдела среднегодовые положительные температуры для северо-таёжной подзоны 1,94 °С, для среднетаёжной подзоны 2,06 °С.

Образование льда в почвах криометаморфического отдела происходит сезонно: в период отрицательных температур с середины октября (ноября) по апрель (середину мая).

Лед в порах является главным образователем угловато-крупитчатой структуры и проявителем кремнистых присыпок на нижних границах агрегатов.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РНФ и РФФИ (22-17-20011 и 19-29-05259).

Литература

- Van Vliet-Lanoe B. (1998) Frost and soils: implications for paleosols, paleoclimates and stratigraphy *Catena* **34**, 157-183.
- Гаврилова И.П., Тонконогов В.Д. (2004) Автоморфные почвы *Атлас Ханты-Мансийского автономного округа — Югры. Ханты-Мансийск Т. 2*, 79-80.
- Долгова Л.С., Гаврилова И.П. (1972) Особенности почв средне- и северотаежных подзон Западной Сибири (в пределах Тюменской области) *Природные условия Западной Сибири* **1**, 77–90.
- Каверин Д.А., Пастухов А.В., Жангуров Е.В. (2016) Особенности температурного режима светлосезонов северотаежных ландшафтов (Европейский северо-восток России) *Известия Коми НЦ УрО РАН* **1 (25)**, 23 – 29.
- Караваева Н.А. (1973) Кислые элювиально-глеевые почвы средней и северной тайги Западной Сибири *Почвоведение* **3**, 3-18.
- Коркина Е.А., Крюкова Ю.А., Сафин А.Р. (2023) Влияние распределения влаги на дифференциацию профиля криометаморфических почв *Scientific Journal* **1**, 5 – 13.
- Никитин Е.Д. (2013) Функционально-динамическое почвоведение и земледелие. *Тайжно-лесное образование*, 576.
- Овчинников А. Ю. (2009). Палеокриогенез как фактор дифференциации современных почв и почвенного покрова центра Восточно-Европейской равнины. *Бюл. МОИП, отдел биол.*, **114(3)**, 144.
- Скворцова Е. Б., Шеин Е. В., Романенко К. А., Абросимов К. Н. (2020) Формирование пузырьковых пор в агрегатах из элювиального горизонта дерново-подзолистой почвы *Почвоведение* **7**, 840-849.
- Тумель Н.В. (2004) Распространение и температура мерзлых и талых пород *Атлас Ханты-Мансийского автономного округа-Югры. Том II Природа и экология. Ханты-Мансийск-Москва*, 51.
- Федорова Н.М. (1970) Температурный режим суглинистых почвогрунтов водоразделов Сосьвинского Приобья Западной Сибири и некоторые аспекты современного почвообразования *Почвоведение* **3**, 74-91.
- Федорова Н.М., Ярилова Е.А. (1972) Гидротермический режим и морфология суглинистых почвогрунтов средней тайги Западной Сибири *Почвоведение* **7**, 79-88.
- Хренов В.Я. (2002) Почвы Тюменской области, 156.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И МЕТАНА НА БЕРЕГОВОМ УЧАСТКЕ КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА, КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

Кочкина М. В.¹, Солдаткина М. А.², Сатосина Е. М.², Ильичев И. А.², Романенко В. А.²,
Кременецкий В. В.¹, Ольчев А. В.^{1,2}, Гулев С. К.¹

¹Институт океанологии имени П.П. Ширшова, РАН, г. Москва

²МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

VARIABILITY OF CARBON DIOXIDE AND METHANE FLUXES ON THE COASTAL
SITE OF THE CARBON POLYGON, KRASNODAR REGION

Kochkina M.V.¹, Soldatkina M.A.², Satosina E.M.², Ilyichev I.A.², Romanenko V.A.²,
Kremenetsky V.V.¹, Olchev A.V.^{1,2}, Gulev S.K.¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow

² Lomonosov Moscow State University, Moscow

Annotation: The aim was to obtain new experimental data on CO₂ and CH₄ fluxes at the soil surface in the coastal forest area of the carbon supersite in the Krasnodar region. CO₂ and CH₄ fluxes were measured using a portable mobile chamber and a LI-7810 portable infrared gas analyzer.

Введение

Материалы конференции будут разосланы участникам и размещены в свободном доступе. Современные изменения климата характеризуются резким ростом глобальной температуры, изменением режима осадков и увеличением повторяемости и интенсивности экстремальных явлений погоды (Flores-Rentería, 2022; IPCC, 2022). Большинство экспертов по изменению климата данные изменения связывают с ростом концентрации CO₂ и других парниковых газов в атмосфере от природных и антропогенных источников (Anderson, 2016; Flores-Rentería, 2022; Forster, 2023; Lynas, 2021). Лесная растительность играет значительную роль в формировании углеродного баланса земной поверхности, тем самым оказывая существенное влияние на климат (Ольчев, 2017; Li, 2023; Shvidenko, 2013). Лесные экосистемы не только поглощают CO₂ из атмосферы при фотосинтезе, накапливая его в надземной и подземной биомассе, но также и активно выделяют CO₂ при автотрофном и гетеротрофном дыхании (Tang, 2021; Li, 2023; Shvidenko, 2013). CO₂ образуется в почве благодаря корневному дыханию и разложению органического вещества почвенными микроорганизмами (Dong, 1998). CH₄ образуется преимущественно в анаэробных условиях на суше и океане. Активными природными источниками CH₄ для атмосферы служат болота и многолетнемерзлые грунты. При аэробных условиях отмечается поглощение CH₄ лесными почвами.

Скорость эмиссии и поглощения парниковых газов поверхностью почвы определяется совокупностью абиотических и биотических факторов, и характеризуется значительной пространственной и временной изменчивостью. На величину потоков парниковых газов влияет температура почвы, её влажность и кислотность, плотность корней растений, количество почвенных микроорганизмов и питательных веществ (IPCC, 2022; Ludwig, 2001; Ruan, 2023).

Объекты и методы

Карбоновый полигон Института Океанологии имени П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) расположен вблизи г. Геленджик в Краснодарском крае на берегу Черного моря. Карбоновый полигон состоит из морской и береговой части. Береговая часть полигона расположена на южном склоне холма со средней крутизной 15-20 и имеет площадь около 6 га. Растительный покров берегового участка представлен крайне неоднородной травянистой, кустарниковой и древесной растительностью. Преобладающий тип почв – дерново-карбонатные. Измерения потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы на береговом участке карбонового полигона проводились методом экспозиционных камер по закрытой схеме. Для измерений была использована портативная почвенная камера Smart Chamber (LI-COR, США), соединённая с инфракрасным газоанализатором LI-7810 (LI-COR, США). Для измерения температуры и влажности почвы был использован датчик HydraProbe (Stevens, США). Для изучения пространственного распределения потоков парниковых газов на береговом участке было выбрано 17 основных экспериментальных площадок, равномерно покрывающих всю исследуемую территорию. Для проведения измерений потоков у поверхности почвы с выбранных площадок полностью убирался травянистый покров для исключения влияния фотосинтезирующих растений на измерения скорости почвенного дыхания. Протокол измерений, включающий установление времени экспозиции камеры и числа повторностей, настраивался вручную. Исследования пространственной изменчивости потоков проводились в периоды с преимущественно ясной погодой с 12:00 до 16:00. Измерения суточной изменчивости потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы в летний период проводились на двух выбранных площадках в северной и южной части полигона с 8:00 до 20:00 с интервалом 30 минут. В осенне-зимний период измерения суточной изменчивости потоков CO_2 и CH_4 проводились ежечасно с 6:00 до 6:00 следующего дня.

Результаты и обсуждение

Пространственная изменчивость потоков CO_2 и CH_4

Результаты проведенного исследования потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы на участке карбонового полигона в Краснодарском крае показали значительную пространственную и временную изменчивость потоков,

определяемую локальными ландшафтными особенностями выбранного экспериментального участка, а также температурой и влажностью почвы. Дыхания могут быть связаны с различиями в запасах органического углерода в почве на разных участках, различиями во влагосодержании и температуре верхних почвенных горизонтов. Экстремально высокие температуры почвы, отмеченные на отдельных участках, могли превышать оптимальные диапазоны температур для функционирования почвенных микроорганизмов и бактерий, что приводило к снижению почвенной эмиссии CO_2 . Максимальные скорости эмиссии CO_2 ($5.88 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$) с поверхности почвы отмечались в центральной и северной части берегового участка полигона, покрытого древесной растительностью. Подобное увеличение эмиссии CO_2 может быть связано как с высоким корневым дыханием древесных растений, так и с высокой активностью почвенных микроорганизмов (рис. 1а, в). Рассматривая пространственную неоднородность потоков CH_4 можно отметить, что весь исследуемый береговой участок карбонового полигона служил стоком CH_4 из атмосферы на протяжении всего периода измерений. Минимум поглощения CH_4 составил $0.49 \text{ нмоль/м}^2\text{с}$, а максимум поглощения CH_4 – $1.43 \text{ нмоль/м}^2\text{с}$, соответственно. Максимальные скорости поглощения CH_4 отмечались в юго-восточной части полигона, на участке, заросшем кустарником. По мере продвижения к северной части полигона скорость поглощения CH_4 почвой постепенно снижалась (Рис. 1д).

Основными факторами, влияющими на пространственное распределение потоков CH_4 , также могли являться различия в температуре и влажности почвы, определяемые сложным рельефом, мозаичным распределением растительности и неравномерным прогревом поверхности почвы исследуемого участка карбонового полигона (рис. 1а, д). В осенне-зимний период 2022-23 года максимальные температуры почвы отмечались в южной и центральной части берегового участка полигона (около 21°C). Минимальный прогрев поверхности составил 12.4°C и наблюдался в его северной и западной части соответственно (рис. 1б). Максимальные скорости выделения CO_2 почвой (до $4.3 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$) отмечались в восточной части исследуемого берегового участка. Минимальные скорости эмиссии CO_2 составили около $1.0 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$ и отмечались преимущественно в восточной и южной части полигона (рис. 1г). Сопоставление пространственного распределения потоков CO_2 и температуры почвы показывает тесную зависимость скорости почвенного дыхания от температуры почвы в осенне-зимний период. Максимальные скорости выделения CO_2 приурочены к наиболее интенсивно прогреваемым участкам. Максимальное поглощение CH_4 почвой наблюдалось в северной и центральной части берегового участка полигона (до $0.9 \text{ нмоль/м}^2\text{с}$). Минимум поглощения CH_4 почвой составил около $0.10 \text{ нмоль/м}^2\text{с}$ и отмечался в северо-восточной и южной части полигона (рис. 1е). Подобное распределение потоков CH_4 может быть связано с пространственной неоднородностью температуры и

влажности почвы, определяемых как сомкнутостью растительного полога, так и плотностью и видовым составом растительности.

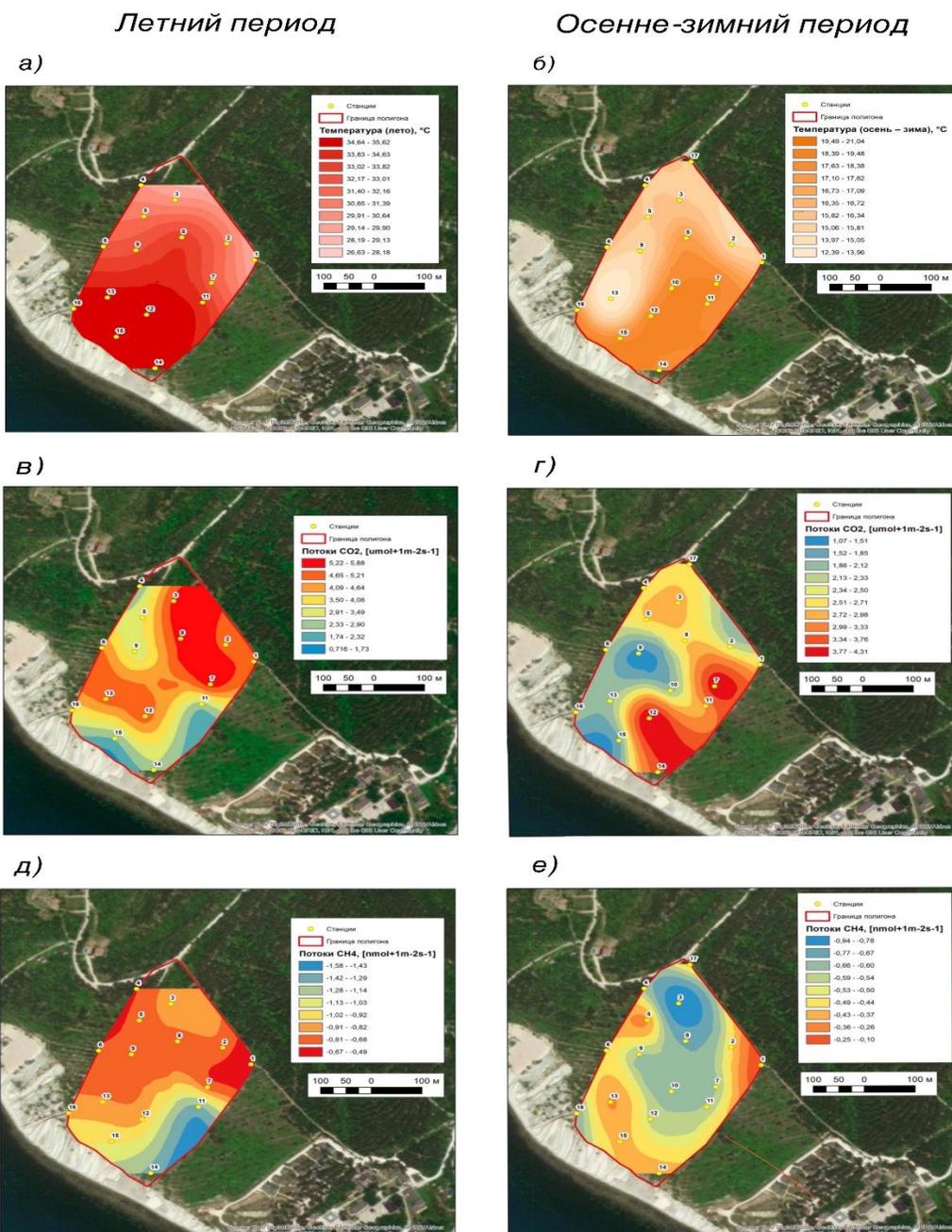


Рис. 1. Пространственное распределение средней температуры почвы (5 см) (а, б), потоков CO₂ (в, г) и CH₄ (д, е) у поверхности почвы в летний (а, в, д) и осенне-зимний (б, г, е) период 2022 года на карбоновом полигоне. Цифрами обозначены номера экспериментальных площадок

Годовая изменчивость потоков CO₂ и CH₄

Сезонная динамика эмиссии CO₂ с поверхности почвы характеризовалась хорошо выраженным годовым ходом с максимумом в летние месяцы 2022 г. (более 6 мкмоль/м²с в июне 2022 года). В осенние и зимние месяцы отмечается постепенное снижение скорости эмиссии CO₂ с поверхности почвы до 1.8 мкмоль/м²с в январе 2023 г. В весенние месяцы 2023 года с ростом температуры отмечается плавное увеличение скорости почвенной эмиссии CO₂ до 4 мкмоль/м²с в апреле 2023 г. Таким образом, с учетом наблюдаемой годовой изменчивости температуры и влажности почвы на полигоне, можно рассматривать температуру в качестве основного движущего фактора, определяющего изменения эмиссии CO₂ с поверхности почвы в годовом ходе. Анализируя внутригодовую изменчивость потоков CH₄, можно отметить, что на протяжении всего года почвенный покров служил стоком CH₄ из атмосферы. Максимальные значения поглощения CH₄ отмечались в летний период 2022 г., составляя в среднем -0.6 ... -0.8 нмоль/м²с. В зимний период скорости поглощения CH₄ существенно снизились (до -0.35 нмоль/м²с в феврале 2023 г.). Основными факторами, влияющими на данные изменения потока CH₄ во времени, можно считать температуру и влажность почвенного покрова, определяемую количеством выпадающих осадков.

Суточный ход потоков CO₂ и CH₄

В летний период суточная динамика потоков CO₂ и CH₄ на выбранных площадках с лесной и кустарниковой растительностью характеризовалась сходными закономерностями (рис. 2а, б). Минимум поглощения CH₄ приходился на утренние часы. В течение светового дня происходило увеличение скорости поглощения CH₄ на обеих площадках, достигая максимума в вечерние часы (до 0.65 нмоль/м²с на южной площадке, и до 0.42 нмоль/м²с – на северной). Потоки CO₂ с поверхности почвы в дневном ходе на обеих исследуемых площадках устойчиво следовали за изменением температуры почвы. Максимум температуры в условиях ясной малооблачной погоды отмечался в период с 15:00 до 16:00, достигая 28°C на северной (рис. 2г) и 40°C – на южной площадке (рис. 2д). Как возможное следствие выявленных различий, максимальные скорости эмиссии CO₂ на южном участке были выше, чем на северном участке (рис. 2а, б).

Выявленные различия могут быть также обусловлены и разницей в почвенном влагосодержании на обоих участках: на северной площадке отмечались существенно более высокие значения влажности почвы в дневное время, чем на южной площадке (рис. 2г, д). В суточном ходе максимальное влагосодержание почвы на северной площадке отмечалось в утренние часы – 0.39 м³/м³ (рис. 2г), тогда как на южной площадке максимум влажности приходился на период между 13:00 и 15:00, составив 0.192 м³/м³ (рис. 3д). При анализе суточной динамики потоков CO₂ и CH₄, температуры почвы и влажности на обеих площадках, можно отметить существенное влияние типа и структуры растительного покрова на температурный

и влажностный режим почвы и, как следствие, на максимальные скорости потоков и на их внутрисуточную изменчивость. Древесная растительность в северной части полигона существенно снижала приход солнечной радиации к поверхности почвы. Южная площадка была достаточно открытой и отличалась максимальными величинами приходящей к поверхности почвы солнечной радиации. Значительный перегрев поверхности обеспечил и экстремально низкие значения влажности в верхних почвенных горизонтах. Суточная динамика потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы в осенне-зимний период значительно отличалась от летнего периода, что связано, прежде всего, с отличными от летнего периода температурными и влажностными условиями верхних почвенных горизонтов. В утренние часы на лесной площадке отмечался максимум поглощения CH_4 , тогда как минимальное поглощение CH_4 почвой – в дневные и вечерние часы. Минимальные скорости эмиссии CO_2 отмечались в утренние часы, тогда как максимум эмиссии CO_2 отмечался на фоне роста температур в полуденные часы, достигая $3.6 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$ (рис. 2в, е).

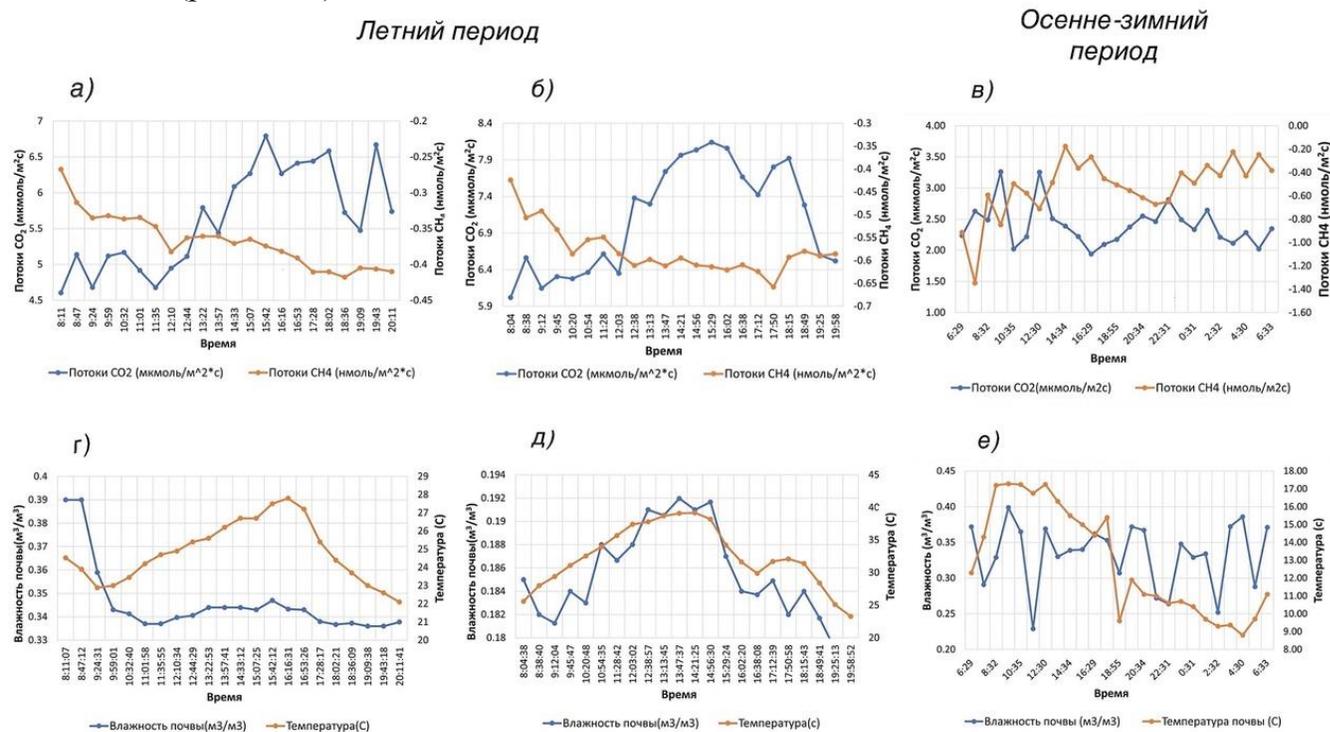


Рис.2. Суточный ход температуры и влажности почвы, потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы на площадках в северной (а, г) и южной (б, д) частях полигона в летний период, а также в осенне-зимний период на северном участке полигона (в, е)

Выводы

Результаты проведенного исследования потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы на участке карбонового полигона в Краснодарском крае показали значительную пространственную и временную изменчивость потоков, определяемую локальными ландшафтными особенностями выбранного экспериментального участка, а также температурой и влажностью почвы. На протяжении всего периода исследований в 2022 и 2023 гг. почвенный покров берегового участка карбонового полигона служил устойчивым источником CO_2 в атмосферу и поглотителем CH_4 из атмосферы. Береговой участок карбонового полигона отличается значительной пространственной неоднородностью потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы, определяемой экспозицией склонов, структурой и видовым составом растительности, влияющих на температурный и влажностный режим верхних почвенных горизонтов. В сезонном ходе максимум выделения CO_2 с поверхности почвы приходился на июнь 2022 г., а минимум – на апрель 2023 г. Максимум поглощения CH_4 почвой отмечался в июне 2022 г., а минимум – в апреле 2023 г.

Измерения потоков парниковых газов на карбоновом полигоне в Краснодарском крае проводились в рамках реализации научной темы госзадания ИО РАН: FMWE-2023-0001. Анализ чувствительности потоков парниковых газов к изменению условий внешней среды проведен Ольчевым А.В. при поддержке гранта РФФ 22–17–00073.

Литература

- Olchev, A.V., Avilov, V.K., Baibar, A.S. & Belotelov N.V. et al. (2017), “Forests of the European part of Russia in a changing climate”, Association of Scientific Publications КМК, Moscow, 276 p.
- Anderson, T.R., Hawkins, E. & Jones, P.D. (2016), “CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today’s Earth System Models”. *Endeavour. Sep*; **40(3)**, 178-187.
- Tang, X., Shi, Y., Luo, X., Liu, L. et al. (2021), “A decreasing carbon allocation to belowground autotrophic respiration in global forest ecosystems”, *Science of the Total Environment*, **798**, 149-273.
- Dong, Y., Scharffe, D., Lobert, J. & Crutzen, P. (1998), “Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from a temperate forest soil”, *Tellus B*, **50(3)**, 243-252.
- Flores-Rentería, D., Delgado, J., Campuzano, E. & Yuste, J. (2022), “Seasonal controlling factors of CO₂ exchange in a semiarid shrubland in the Chihuahuan Desert, Mexico”, *The Science of the Total Environment*, **858(3)**, 159918.
- Forster, P.M., Smith, C.J., Walsh, T., Lamb, W.F. & Lamboll, R. et al. (2023), “Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of

- the climate system and human influence”, *Earth System Science Data*, **15(6)**, 2295-2327.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 p.
- Li, C., Yang, F., Xiao, Q. & Gao, Y. (2023), “Climate Change and Its Impacts on Terrestrial Ecosystems: Recent Advances and Future Directions”, *Atmosphere*, **14(7)**, 1176.
- Ludwig, J., Meixner, F.X., Vogel, B. & Förstner, J. (2001), “Soil-air exchange of nitric oxide: an overview of processes, environmental factors, and modeling studies”, *Biogeochemistry*, **52**, 225-257.
- Lynas, M., Houlton, B.Z., & Perry, S.L. (2021), “Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature”, *Environmental Research Letters*, **16**, 14005.
- Ruan, Y., Kyzakov, Y. Liu, X. & Zhang, X. et al. (2023), “Elevated temperature and CO₂ strongly affect the growth strategies of soil bacteria”, *Nature Communications*, **14**, 391.
- Shvidenko, A., Gustafson, E A., McGuire, D. & Kharuk, V. et al. (2013), “Terrestrial Ecosystems and Their Change, Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences”, New York – London: Springer Netherlands. Chapter: 6, pp. 171-249.

УДК 631.423.6:631.82

СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ ПОЧВ ГОРОДСКИХ ГАЗОНОВ

Кулачкова С.А., Деревенец Е.Н., Максаева Е.С.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
kulachkova_sa@inbox.ru

WAYS FOR REGULATING CARBON DIOXIDE FLUXES FROM URBAN LAWN SOILS

Kulachkova S.A., Derevenets E.N., Maksaeva E.S.

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation. The results of vegetation experiments with gray humus horizons of urban soils and lawn vegetation are considered. Two types of complex mineral fertilizers and four types of biochars were studied. The application of fertilizer with the composition NPKS 21:10:10:2 reduced CO₂ emission by 17-47% compared to the control for a first month. Two types of biochars reduced CO₂ emissions by 8-39% compared to the control.

Введение

По последним обобщенным глобальным данным концентрация диоксида углерода (CO₂) в атмосфере достигла 417,9±0,2 ppm, что составляет 150% от доиндустриального уровня, за который принимается 1750 г. (State of..., 2024). Увеличение концентрации парниковых газов – одна из причин происходящих на планете глобальных климатических изменений, поэтому привлекает пристальное внимание ученых и общественности. Примерно треть поступающего в атмосферу CO₂ связано с почвенным дыханием (Кудеяров, 2015). Городские почвы с повышенным содержанием органического вещества могут эмитировать более высокие количества диоксида углерода по сравнению с окружающими территориями. В связи с этим изучение газообмена городских почв и поиск способов регулирования эмиссии CO₂ становится весьма актуальной задачей.

В последнее время появляется большое количество научных исследований влияния применения минеральных удобрений и биоугля на эмиссию парниковых газов почвами. Однако большинство этих работ посвящено не урбоэкосистемам, а агроэкосистемам и управляемым лесам, и получаемые эффекты часто имеют разнонаправленный характер, что требует дальнейшего уточнения. Так, например, внесение азотных удобрений может приводить как к снижению интенсивности почвенного дыхания (Ding et al., 2007; Wang et al., 2017), так и, напротив, – к повышению (Chen et al., 2018; Zhang et al., 2021). Внесение биоугля в первую очередь влияет на физические свойства почв, обуславливающие газообмен и активность микроорганизмов. Биоуголь повышает водоудерживающую способность почв,

улучшает агрегатное состояние, увеличивает общую пористость почвы, повышает удельную поверхность, катион-обменную способность, рН почв (Рижия и др., 2015). Для различных агропочв установлена возможность снижения эмиссии CO₂ и накопление углерода в почвах при добавлении биоугля, показано, что влияние биоугля зависит от его дозы (Lal, 2004). Биоугли, произведенные при разных температурах, могут влиять на эмиссию CO₂ по-разному. Так, биоуголи, полученные при 300°C увеличивали, а при 450, 500 и 600 °C снижали совокупные выбросы CO₂ в инкубационных экспериментах (Sheng, Zhu, 2018; Yang et al., 2022). В ряде работ отмечено увеличение потоков парниковых газов из почв в первый год после внесения биоуглей, что обусловлено повышением микробной активности при добавлении мелиорантов (Sistani et al., 2019).

Целью настоящего исследования была оценка эмиссии CO₂ из мезокосмов городских почв при внесении комплексных минеральных удобрений, биоуглей и посевом газонных трав. Предстояло решить следующие задачи: измерить потоки CO₂ модельных экосистем по мере роста газонных растений при внесении удобрений и биоуглей; выявить удобрение и биоугли, которые можно использовать для снижения выделения CO₂ из почв под газонами.

Объекты и методы

Объектом исследования выступил верхний горизонт серогумусовой урбистратифицированной среднесуглинистой почвы (название почвы по классификации из работы Прокофьевой и др., 2018). Образцы отбирались в Ботаническом саду МГУ на Ленинских горах с участка с многолетним газоном с глубины 0-20 см, высушивались до воздушно-сухого состояния, просеивались через сито 3 мм.

Опыт проводился в вегетационных сосудах (объем 1 л). Использовалось два вида комплексных минеральных удобрений и четыре вида биоуглей. Удобрения (производства компании «Уралхим») различались по соотношению питательных элементов и формам азота: нитратно-аммонийная «Нитроаммофоска NPKS 21:10:10:2» (далее Нитроаммофоска) и аммонийно-нитратно-амидный «Универсал NPK 18:18:18 + 3 MgO + микроэлементы» (далее Универсал). Среди биоуглей два были изготовлены ООО «Вятская угольная компания» из березовой древесины – «Березняк Биочар» (далее ББ, Т производства 500-600°C, рН_{H2O} 8.2, С 83.7%) и «Березняк Активированный уголь» (далее БАУ, Т производства 900°C, рН_{H2O} 9.9, содержание С 85.6%); один биоуголь изготовлен ООО «Энерголеспром» из растительной биомассы без уточнения (далее БЭ, Т производства 450-500°C, рН_{H2O} 7.9, содержание С 67.5%) и еще один – «Биочарка» Termalica изготовлен ООО «ВИСОЛ ОПТ» из хвойных пород древесины (далее БТ, температура производства 600°C, рН_{H2O} 9.8, содержание С 84.9%).

Мезокосм был устроен следующим образом (рис. 1): нижний слой – керамзит, на нем геотекстиль, и верхний слой – серогумусовый горизонт ($pH_{H_2O} - 6.5$, $C 6.5\%$). Масса всех компонентов была одинаковой во всех сосудах. На поверхность почвенного образца вносились биоугли или минеральные удобрения. Доза биоугля составила 1% по массе (Рижия и др., 2014). Доза минеральных удобрений была выбрана как потенциально оптимальная для поддержания нормального функционирования растительного и микробного сообщества газонов и составила $60 \text{ кг N} \cdot \text{га}^{-1}$. (Постановление..., 2002; Кулачкова и др., 2023). Сверху на поверхность почвенного образца помещалось основание для последующей установки эмиссионной камеры. В сосуды сеялась газонная травосмесь, состоящая из овсяницы красной 45%, мятлика лугового 12%, райграса однолетнего 18%, райграса многолетнего 20% и тимopheевки 5%. Норма высева составила $50 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$. Варианты опыта в 2023 г.: КР – контроль, НР – Нитроаммофоска, УР – Универсал, ББ – биоуголь «Березняк Биочар», БАУ – биоуголь «Березняк Активированный уголь», БЭ – биоуголь «Энерголеспром», БТ – биоуголь «Биочарка» Termalica. В феврале 2024 г. были повторно внесены удобрения в варианты НР и УР, а в варианты с биоуглями было добавлено удобрение Нитроаммофоска: ББ-Н, БАУ-Н, БЭ-Н, БТ-Н. Повторность опыта трехкратная.



Рис.1. Этапы создания мезокосмов и определение потоков CO_2 камерным методом

В конце февраля 2023 г. перед началом эксперимента образцы почв в сосудах увлажнили дистиллированной водой до 60% полной влагоёмкости и прединкубировали в течение 7 суток при комнатной температуре (в вариантах с биоуглем его внесли с самого начала прединкубации). Затем в течение недели измеряли эмиссию CO_2 для установления ее постоянного начального уровня. Еще через неделю посеяли указанную выше газонную смесь (13.03.2023). Измерение эмиссии CO_2 и гидротермических параметров проводили через одни сутки после посева травы, далее один раз в неделю в течение 2-х месяцев и потом 2 раза в 3-й месяц. Срез травы осуществлялся 11.04, 12.05 и 14.06.2023 г. На протяжении эксперимента влажность поддерживалась путем взвешивания и добавления воды до первоначальной массы сосуда. В июле 2023 – январе 2024 г. измерения эмиссии CO_2 не проводились, но опыт поддерживался путем регулярного полива и срезания

отрастающей фитомассы. В конце января 2024 г. были удалены остатки предыдущей растительности, и начался второй этап измерений эмиссии CO₂. В течение недели устанавливался начальный уровень эмиссии, 12.02.2024 г. были внесены удобрения в дозе 60 кг N·га⁻¹ и вновь посеяна газонная смесь. Измерения эмиссии CO₂ проводились один раз в неделю в течение месяца, 06.03.2024 был произведен укос фитомассы.

Потоки CO₂ определялись камерным методом со временем экспозиции 3 минуты на следующие сутки после полива. В светонепроницаемых камерах измерялась эмиссия CO₂, обусловленная дыханием почвенных образцов и растений, в светопроницаемых – эмиссия или поглощение CO₂, характеризующие нетто-экосистемный обмен в мезокосме (рис. 1). Отбор проб воздуха из камеры производили инсулиновыми шприцами. Сразу же измеряли содержание CO₂ в пробах воздуха на газовом хроматографе Кристаллюкс 4000М (НПФ «Мета-хром», Йошкар-Ола, Россия) с детектором по теплопроводности. Эмиссию (или поглощение CO₂) рассчитывали по формуле: $q = \Delta C \cdot 1000 \cdot h / \Delta t$, где q — эмиссия или поглощение CO₂, мг·м⁻²·ч⁻¹, ΔC — изменение концентрации газа в камере (г·м⁻³) за время экспозиции Δt (ч), h — высота камеры (м) (Смагин, 2005).

Параллельно с эмиссией измерялась температура почвы (электронным термометром HI98501 Checktemp (Hanna Instruments, разрешение 0,1°C, точность ±0,2°C), и влажность путем взвешивания сосудов. pH водной суспензии образцов почв и биоуглей определялся потенциометрическим методом (соотношение биоуголь или почва : вода 1:2,5); содержание общего углерода в биоуглях и образце серогумусового горизонта – методом сухого сжигания на Primacs SNC100-IC (SKALAR, Нидерланды), они приведены выше при характеристике объектов исследования.

Статистическая обработка проводилась в программе Statistica 12.0. Из-за малого числа повторностей (n=3) и высокой вариабельности эмиссии приводятся медианные значения и межквартильные размахи, выраженные в % от медианы. Сравнение выборок проводилось по U-тесту Манна-Уитни, корреляционные связи устанавливались на основе рангового коэффициента корреляции Спирмена (rs), уровень значимости 0.05.

Результаты

В течение всего эксперимента температура почв была 20±4°C, влажность почв в поддерживалась на уровне около 40%. В день измерений эмиссии CO₂ различие температуры в сосудах не превышало 0.7-2.5°C, влажности – 0.5-2.5%. Показатели pH за год вегетационного опыта увеличились в контроле на 0,3 единицы, при внесении биоуглей на 0,5-0,6 единиц, но значимо не различались.

До посева растений эмиссия CO₂ отражала только почвенное дыхание и составляла по медианным значениям 239 мг·м⁻²·ч⁻¹ в контрольном сосуде, 164-

$182 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ – в сосудах, куда впоследствии вносились удобрения (УР и НР), и в сосудах с биоуглями: ББ – 312, БАУ – 251, БЭ – 318, БТ – $246 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Межквартильный размах составлял 24-44% от медианных значений.

Экосистемное дыхание мезокосмов по мере отрастания растений. После посева газонной травы эмиссия CO_2 , отражающая дыхание почвы и растений, в контрольных сосудах стабильно увеличивалась каждую неделю по мере отрастания корней и зеленой массы растений. К концу первого и второго месяца эксперимента эмиссия CO_2 увеличилась в 2 раза по сравнению с первыми днями после посева/среза травы и составляла 488 и $503 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ соответственно, в третий месяц – в 1.6 раза. Похожая ситуация была при внесении удобрения Универсал: эмиссия CO_2 увеличивалась по мере отрастания травы в 2 раза к концу первого месяца по сравнению с начальным уровнем, в 2.3 раза к концу второго и, в отличие от контроля, – в 3,7 раза к концу третьего месяца. При внесении Нитроаммофоски эмиссия CO_2 от недели к неделе могла как увеличиваться, так и уменьшаться, но в целом к концу месяца при максимальной фитомассе она была выше начального уровня в 1.7, 1.8 и 2.3 раза соответственно в 1-й, 2-й, и 3-й месяцы. Закономерности изменения эмиссии CO_2 из мезокосмов с биоуглями по мере отрастания травы были аналогичны мезокосмам с Нитроаммофоской. Увеличение эмиссии CO_2 в конце месяцев в вариантах с ББ и БАУ всегда было меньше контроля, в вариантах с БЭ и БТ в один из месяцев прирост эмиссии CO_2 был выше контрольного. В первые полтора месяца эксперимента эмиссия CO_2 в вариантах с внесением удобрений была ниже, чем с биоуглями, а позже этого периода стала ее превышать.

Во второй этап эксперимента, после посева новых растений в феврале 2024 г., эмиссия CO_2 увеличивалась не так сильно по мере их отрастания, как в 2023 г. Вероятно, длительный регулярный полив мезокосмов привел к обеднению их питательными веществами по сравнению с началом эксперимента, вследствие чего сформировалось меньшее количество фитомассы, что повлияло на интенсивность эмиссии CO_2 . Начальная эмиссия в контрольном сосуде составила $155 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, в сосудах с удобрениями $110\text{-}120 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (УР и НР соответственно), в сосудах с биоуглями и добавленной Нитроаммофоской: ББ-Н – $91 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, БАУ-Н – $118 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, БЭ-Н – $141 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, БТ-Н – $155 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Межквартильный размах 32-56% от медианных значений. В контрольных сосудах эмиссия CO_2 возростала в первые две недели в 1.8 раза по сравнению с начальным уровнем, затем прирост прекратился, и к концу месяца она была выше начального уровня всего в 1.2 раза. В сосудах только с удобрениями отмечалась такая же тенденция, но при этом в конце месяца эмиссия CO_2 в них не превышала начальные уровни. В сосудах с биоуглями и Нитроаммофоской эмиссия через месяц после внесения удобрения и отрастания травы была выше начального значения в 1.3-2.1 раза, а в варианте БТ-Н – в 2.5 раз выше.

По изменению почвенной эмиссии, определенной перед посевом трав в 2023 и 2024 г. можно заключить, какой из биоуглей оказал наибольшее влияние на почвенные свойства за год эксперимента. Так интенсивность почвенной эмиссии CO_2 в контрольных вариантах уменьшилась в 1.5 раза. При добавлении биоугля БТ она изменилась примерно так же – в 1.6 раз, что свидетельствует о наименьшем воздействии этого биоугля. Самое большое влияние оказал биоуголь ББ – эмиссия CO_2 почвами с ним уменьшилась в 3.4 раза. Для БАУ и БЭ снижение почвенной эмиссии CO_2 составило в 2.1 и 2.3 раз за год. Вероятно, это связано с тем, что частички этого биоугля были самыми мелкими из всех.

Экосистемное дыхание мезокосмов с удобрениями и биоуглем в сравнении с контролем. Внесение Нитроаммофоски статистически значимо снижало экосистемную эмиссию CO_2 на 22-47% (единично – на 72%) по сравнению с контролем в первый месяц эксперимента, на 17-31% – в половину второго месяца эксперимента, далее эффект прекращался и в третий месяц выделение CO_2 из мезокосмов с этим удобрением на 52-77% превышало контроль. Добавление Универсала не приводило к достоверному снижению эмиссии CO_2 по сравнению с контролем в первые два месяца, а в третий месяц выделение CO_2 было выше, чем с Нитроаммофоской.

Активированный биоуголь, вариант БАУ, почти всегда снижал эмиссию CO_2 по сравнению с контрольным вариантом на 8-38% (в дни измерений, когда снижения не наблюдалось, превышение контроля было не больше 10%). Снижение эмиссии CO_2 было отмечено и для варианта ББ в первые три недели эксперимента и потом стабильно через полтора месяца эксперимента. Как и с вариантом БАУ снижение составляло 8-39%. В течение первых двух месяцев опыта биоуголь БЭ уменьшал эмиссию CO_2 на 5-26% по сравнению с контролем, но в третий месяц этот эффект перестал наблюдаться. Применение биоугля БТ привело, как правило, к увеличению эмиссии CO_2 из мезокосмов. Внесение удобрения Нитроаммофоска к мезокосмам с биоуглями в феврале 2024 г. способствовало снижению эмиссии даже в вариантах БТ, на 25-31%, уменьшение выделения CO_2 в вариантах ББ составило 40-73%, в вариантах БАУ – 30-44%, БЭ – 26-29%.

Нетто-экосистемный обмен CO_2 в мезокосмах. Потоки CO_2 , определенные в светопрозрачных камерах, характеризовали поглотительную способность растений мезокосмов. В течение двух недель первого месяца, а потом в течение одной недели всех последующих месяцев эксперимента поглощение CO_2 контрольными вариантами было выше остальных (“-250” – “-349” в 2023 г. и положительный нетто-экосистемный обмен = 39 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в 2024 г.). Это самое первое время после посева или среза травы. В остальное время, как правило, газоны с биоуглями поглощали CO_2 лучше контроля, при этом интенсивность очень сильно варьировала, что затрудняло выявление лучшего варианта. У варианта БТ, в котором практически отсутствовало снижение экосистемной эмиссии CO_2 , поглощение CO_2

часто было очень высоким, что требует более тщательной оценки потоков CO_2 при выборе мелиоранта. В сосудах с удобрениями поглощение CO_2 , превышающее контрольные значения, как правило, наблюдалось только при максимально отросшей фитомассе.

Изменение фитомассы растений при внесении удобрений и биоуглей. В первый месяц эксперимента наименьшей фитомассой в пересчете на сухое вещество характеризовались контрольные варианты – $42,0 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, в остальных она варьировала в диапазоне $49,7\text{-}58,6 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ с максимумом у БТ и БАУ. Во второй месяц фитомасса контроля увеличилась до $67,5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, в вариантах с биоуглями она составляла $54,8\text{-}62,45 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, максимально выросла под действием удобрений – $76,4\text{-}90,4 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$. В третий месяц наибольшая фитомасса снова была в сосудах с удобрениями, а среди биоуглей – под действием БАУ (превышала контроль). Установлена положительная корреляция фитомассы и интенсивности экосистемной эмиссии CO_2 : $r_s = 0,64$, $n = 28$, $p < 0,05$, а также фитомассы и интенсивности поглощения CO_2 растениями: $r_s = 0,73$, $n = 21$, $p < 0,05$. Значительный прирост фитомассы под действием удобрений во второй и третий месяцы эксперимента объясняет исчезновение их эффекта на снижение эмиссии CO_2 .

Выводы

Результаты вегетационных экспериментов с серогумусовыми горизонтами городских почв и газонной растительностью показали следующее. Эмиссия CO_2 модельной экосистемой газона увеличивалась с ростом растений. Применение удобрения Нитроаммофоска (NPKS 21:10:10:2) в первые два месяца эксперимента, а также биоуглей из березовой древесины (в течение трех месяцев) снижало прирост эмиссии по сравнению с приростом в контрольном варианте.

Абсолютные значения эмиссии CO_2 мезокосмами с Нитроаммофоской были статистически значимо ниже, чем контрольные, на 17-47% в первые полтора месяца эксперимента. Снижение эмиссии CO_2 при внесении удобрения Универсал (NPK 18:18:18 + 3 MgO + микроэлементы) не было статистически достоверным. Применение 2-х типов биоуглей из березовой древесины уменьшало эмиссию CO_2 на 8-39% по сравнению с контролем.

Регулирование количества отрастающей фитомассы газонов важно для управления потоками CO_2 из них в атмосферу.

Таким образом, повышенную эмиссию диоксида углерода из городских газонов возможно регулировать путем подбора оптимального сочетания удобрений и мелиорантов при их создании и поддержании.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800147-0 «Почвенные информационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов»).

Литература

- Кулачкова С.А., Деревенец Е.Н., Королев П.С., Пронина В.В. (2023). Влияние минеральных удобрений на дыхание почв городских газонов. *Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение* **78:3**, 103-114.
- Кудеяров В.Н. (2015). Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России *Почвоведение*. **9**, 1049-1060.
- Постановление Правительства Москвы от 10.09.2002 N 743-ПП (ред. от 03.09.2019) «Об утверждении Правил создания, содержания и охраны зеленых насаждений и природных сообществ города Москвы».
- Прокофьева Т.В., Герасимова М.И. (2018). Городские почвы: диагностика и классификационное определение по материалам научной экскурсии конференции SUITMA 9 по Москве. *Почвоведение*. **9**, 1057-1070.
- Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М. и др. (2014). Применение биоугля в сельском хозяйстве Российской Федерации. Методические рекомендации. – СПб.: АФИ, 28 с.
- Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М. и др. (2015). Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент). *Почвоведение* **2**, 211-220.
- Смагин А.В. Газовая фаза почв. М., 2005.
- Chen Z., Xu Y., He Y. et al. (2018). Nitrogen fertilization stimulated soil heterotrophic but not autotrophic respiration in cropland soils: A greater role of organic over inorganic fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry* **116**, 253-264. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.029>
- Ding W., Cai Y., Cai Z. et al. (2007). Soil respiration under maize crops: Effects of water, temperature, and nitrogen fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **71**:944–951.
- Lal R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, **123**, 1-22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032
- Sheng Y., Zhu L. (2018). Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH. *Science of the Total Environment* **622–623**, 1391–1399. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.337>.
- State of the global climate 2023. WMO-No 1327, 2024. https://library.wmo.int/viewer/68835/download?file=1347_Statement_2023_en.pdf&type=pdf&navigator=1

- Sistani K., Simmons J., Jn-Baptiste M., Novak J. (2019). Poultry Litter, biochar, and fertilizer effect on corn yield, nutrient uptake, N₂O and CO₂ emissions. *Environments* **6**, 55. <https://doi.org/10.3390/environments6050055>.
- Wang Q., Zhang W., Sun T. et al. (2017). N and P fertilization reduced soil autotrophic and heterotrophic respiration in a young *Cunninghamia lanceolata* forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **232**, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.007>
- Yang Y., Sun K., Liu J., Chen Y., Han L. (2022). Changes in soil properties and CO₂ emissions after biochar addition: Role of pyrolysis temperature and aging. *Science of the Total Environment* **839**, 156333. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156333>.
- Zhang S., Li Y., Singh B.P. et al. (2021) Contrasting short-term responses of soil heterotrophic and autotrophic respiration to biochar-based and chemical fertilizers in a subtropical Moso bamboo plantation. *Applied Soil Ecology* **157**, 103758. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103758>

УДК 551.525

ОБ АМПЛИТУДАХ ГОДОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ И СРЕДНЕГОДОВЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ

Лапина Л.Э.¹

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Российская Федерация

l.e.lapina@yandex.ru

ABOUT THE AMPLITUDES OF ANNUAL FLUCTUATIONS ON THE SOIL SURFACE
AND AVERAGE ANNUAL TEMPERATURE VALUES

Lapina L.E.

Water Problems Institute RAS

Annotation: According to data from 1966-2019, it is shown that the amplitude of annual fluctuations on the soil surface at the weather stations Tomsk, Tunka, Bakchar, Khanty-Mansiysk is decreasing, the average annual temperature of the soil surface is decreasing, and at a depth of 240-320 cm it is increasing.

Введение

Амплитуда годовых колебаний температуры на поверхности почвы является одним из основных показателей, влияющим на глубину сезонного промерзания и оттаивания пород (Основы геокриологии, ч.4, 2001).

Объекты и методы

Источником данных послужил сайт www.meteo.ru/data. Были выбраны данные по метеостанциям Томск, Тунка, Бакчар, Ханты-Мансийск. Данные измерений на каждой глубине аппроксимировали функцией следующего вида:

$$T(z, t) = A(z) \sin(\omega t + \varphi(z)) + B(z),$$

где $T(z, t)$ – данные измерения температуры почвы на глубине z (см) в момент времени t (час), $A(z)$ -- амплитуда годовых колебаний ($^{\circ}\text{C}$), $B(z)$ – среднегодовое значение температуры почвы на глубине z ($^{\circ}\text{C}$), $\varphi(z)$ – сдвиг фазы.

Параметр сдвига фаз $\varphi(z)$ является оптимизационным. Для нахождения параметров, описывающих данные наилучшим образом по формуле (6), сначала фиксировали $\varphi(z)$. При фиксированном значении с использованием метода наименьших квадратов получали систему из двух уравнений для параметров A и B , которую решали методом Крамера (Корн, Корн, 1977). Также для каждого фиксированного параметра $\varphi(z)$ вычисляли среднеквадратическую ошибку аппроксимации ε . Затем меняли параметр сдвига фаз на постоянную величину,

равную $2\pi/1000$, снова считали параметры A и B и т.д. Получали некоторый набор величин (A , B , φ , ε). Из этого набора выбирали параметры аппроксимации с наименьшей ошибкой ε . Преимущество этого метода – простота для небольших систем уравнений (два или три уравнения), недостатком является большая относительная ошибка если значение определителя матрицы возникающей системы уравнений близка к нулю.

На поверхности почвы данные измерений были обработаны от 1966 по 2019 года, на глубинах - с 1966 по 2012гг.

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов представлены на рис.1-5.

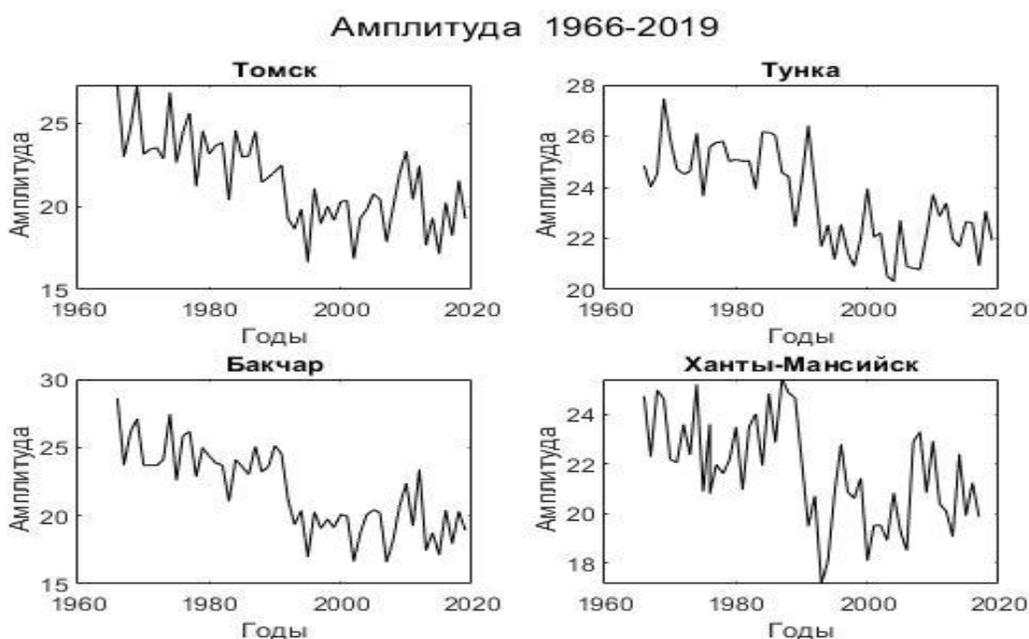


Рис. 1. Амплитуда годовых колебаний температуры на поверхности почвы с 1966-2019гг.

На рис.1 видно, что амплитуды годовых колебаний температуры на поверхности почвы в целом падают, возможно, это обусловлено тем, что температура воздуха зимой растет быстрее по сравнению с летними. Рис.2 показывает более сложное поведение среднегодовой температуры поверхности почвы, в целом падает, но есть и небольшие интервалы роста, возможно, это связано с межгодовой изменчивостью высоты снежного покрова.

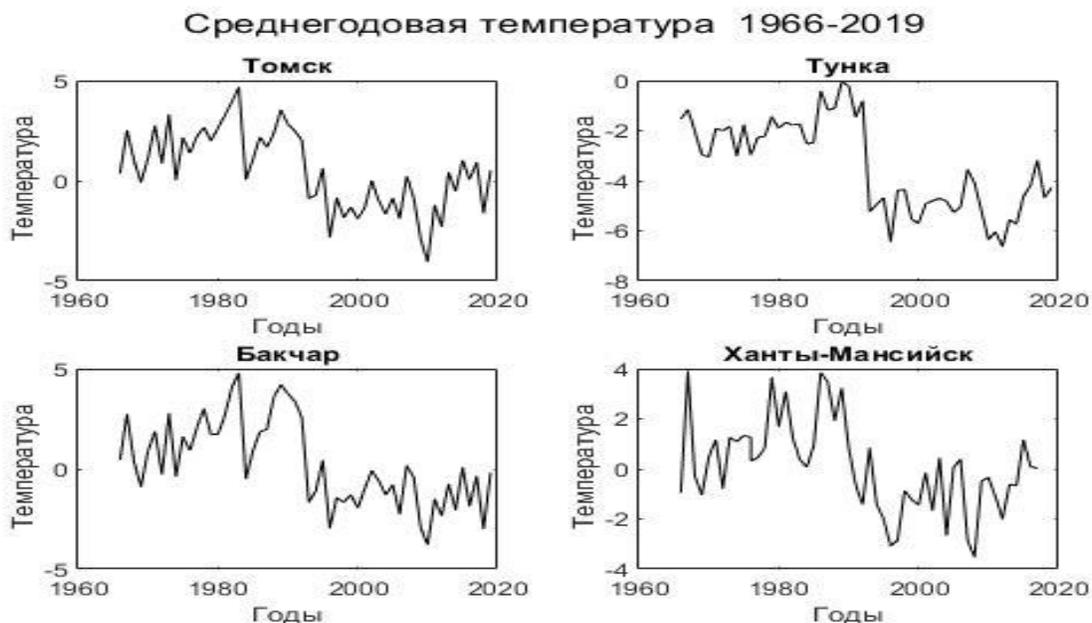


Рис. 2. Динамика среднегодовой температуры на поверхности почвы с 1966-2019гг

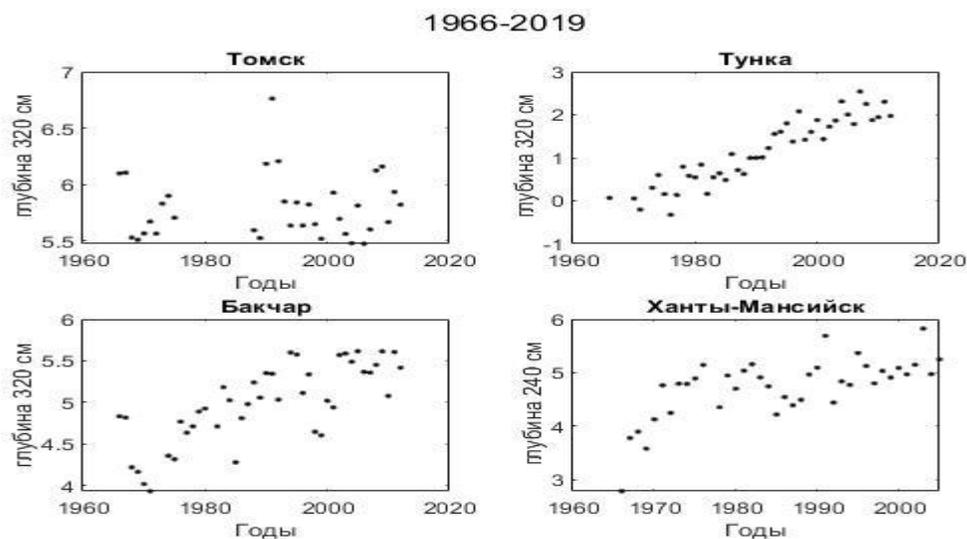


Рис.3. Динамика среднегодовых температур на глубинах 240-320 см. Для Ханты-Мансийска были доступны данные только 240см.

Рис.3 отражает однозначный рост температуры на глубине 240-320 см для метеостанций Тунка, Бакчар, Ханты-Мансийск, наибольший рост отмечается для Тунки, для Томска отмечается сложный характер, там практически отсутствует рост.

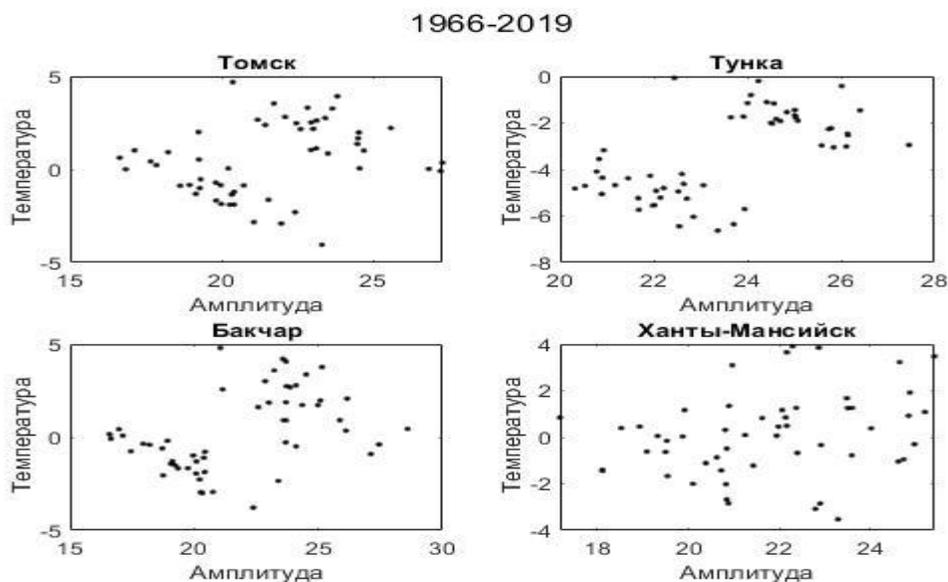


Рис. 4. Связь между амплитудой годовых колебаний температуры на поверхности почвы и среднегодовыми значениями

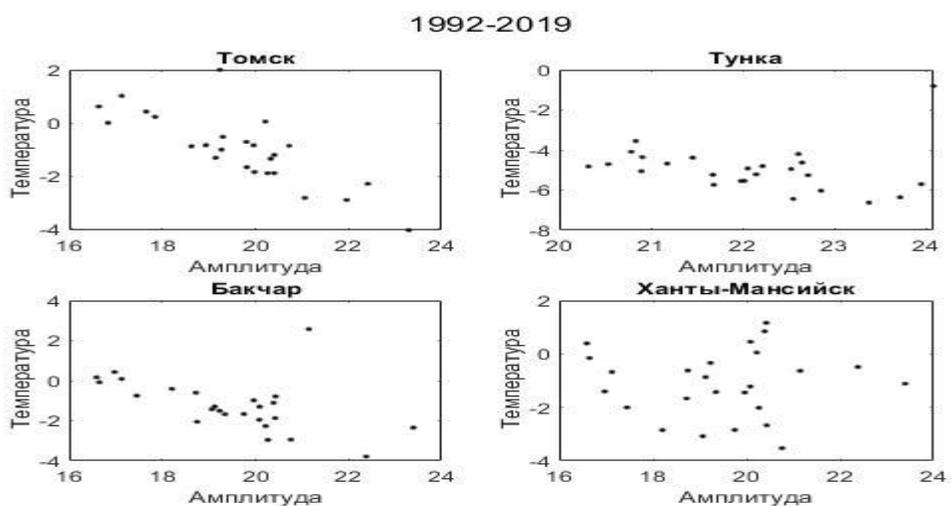


Рис. 5. Связь между амплитудой годовых колебаний температуры на поверхности почвы и среднегодовыми значениями

На рис.4-5 отражены возможные связи между амплитудой годовых колебаний и среднегодовой температурой на поверхности почвы. На рис.4 данные с 1966-2012, на рис.5 с 1992-2012

Казалось бы, на рис.4 никаких закономерностей обнаружить нельзя, но взяв данные с 1992 по 2019гг, получаем более ясную картину

Рис.5 показывает, что для Томска, Тунки и Бакчара отрицательная связь между амплитудой и среднегодовым значением температуры поверхности почвы, т.е. чем больше амплитуда колебаний, тем меньше значение среднегодовой температуры. Для Ханты-Мансийска такой связи не обнаруживается.

Выводы

1. амплитуды годовых колебаний температуры на поверхности почвы в целом падают, возможно, это обусловлено тем, что температура воздуха зимой растет быстрее по сравнению с летними
2. Рис.2 показывает более сложное поведение среднегодовой температуры поверхности почвы, в целом падает, но есть и небольшие интервалы роста, возможно это связано с межгодовой изменчивостью высоты снежного покрова
3. Рис.3 отражает однозначный рост температуры на глубине 240-320 см для метеостанций Тунка, Бакчар, Ханты-Мансийск, наибольший рост отмечается для Тунки, для Томска отмечается сложный характер там практически отсутствует рост.
4. Для Томска, Тунки и Бакчара существует отрицательная связь между амплитудой и среднегодовым значением температуры поверхности почвы, т.е. чем больше амплитуда колебаний, тем меньше значение среднегодовой температуры. Для Ханты-Мансийска такой связи не обнаруживается.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВП РАН FMWZ-2022-0001 (N 122041100222-7)

Литература

Корн Г., Корн Т. (,1977) Справочник по математике для научных работников и инженеров М.. Наука. 1977. 832с
Основы геокриологии.ч.4. Динамическая геокриология (2001) М. Изд-во МГУ. 688с.
Справочник климатических данных www.meteo.ru/data (Дата обращения 03.03.2020)

УДК 631.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАТЕРАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ВЛАГИ НА МИКРОЛАНДШАФТНОМ УРОВНЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЗИЯ-137 В ПОЛУГИДРОМОРФНЫХ ПОЧВАХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

Линник В.Г.¹, Иваницкий О.М.¹, Савельев А.А.¹

¹Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, 119991,
Россия, Москва
linnik@geokhi.ru

MODELING OF LATERAL MOISTURE FLOWS AT THE MICROLANDSCAPE LEVEL
TO ASSESS THE SPATIAL DISTRIBUTION OF CAESIUM-137 IN SEMI-
HYDROMORPHIC SOILS
OF THE BRYANSK REGION

Linnik V.G.¹, Ivanitsky O.M.¹, Saveliev A.A.¹

¹Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences

Annotation: Terrain attributes derived from digital elevation model (DEM) controlled intensity of water flow path and soil moisture. Catchment area, Overland Flow Distance and topographic wetness index (TWI) qualitatively characterizes the intensity soil moisture. A weak level of lateral migration of Cs-137 was revealed depending on DEM derivatives.

Введение

Вода играет определяющую роль в процессах почвообразования: выветривании и гумусообразовании, разложении подстилки, формировании генетических почвенных горизонтов. Химические реакции и обмен химическими элементами между почвенными горизонтами происходит также при участии влаги. Формирование элювиального горизонта в результате выноса гидроокислов железа происходит в условиях сезонного застойно-промывного режима (Зайдельман, 2007).

Неоднородность распределения влаги в почве во многом определяет гетерогенность структуры почвенного покрова (пространственное варьирование мощности почвенных горизонтов), а также анизотропию почвенных свойств, в первую очередь водно-физических (Шейн, 2010). Передвижение воды в почве представляет один из самых сложных потоков в природе (Farthing, Ogden, 2017). Математическое моделирование распределения влаги в почве использует уравнение Ричардса, которое описывает течение воды в ненасыщенной пористой среде. Аналитические решения уравнения Ричардса существуют только для упрощенных случаев, однако предложенные численные варианты решений не обеспечили ожидаемую надежность модельных результатов (Farthing, Ogden, 2017). Таким

образом, объективно существующие проблемы в моделировании водного режима почв в рамках уже используемых подходов, требуют поиска альтернативных вариантов решения проблемы моделирования влагопереноса, что предполагает «переход гидрологии почв на ландшафтный уровень» (Шеин, 2020, с. 181).

В настоящей работе основное внимание уделено физическим механизмам латеральной водной миграции, разработанных в гидрологии и геоморфологии и к настоящему времени уже реализованных в пакетах ГИС-моделирования, таких как SAGA, GRASS и другие. Методология моделирования поверхностного стока в бассейнах речных систем, основанная на анализе цифровых моделей рельефа (ЦМР), к настоящему времени имеет богатую историю и рассмотрена в ряде работ, таких как (Beven, Kirkby, 1979; Western et al., 1999; Tarboton, 2003).

Цель исследования: на примере площадки радиоэкологического мониторинга В1 выполнить ГИС-моделирование латеральных потоков влаги как фактора локального перераспределения Cs-137 на микроландшафтном уровне.

Объекты и методы

Для исследования пространственного распределения Cs-137 в зависимости от условий микрорельефа была выбрана площадка В1 (рис.1, справа). Площадка расположена в западной части Брянской области на удалении около 170 км от Чернобыльской АЭС. Площадка В1 (размером 70x50 м) расположена в нижней части пологого склона южной экспозиции (ельник-черничник и осинник с гидроморфными почвами). Почва характеризуется комплексностью, обусловленной неоднородностью микрорельефа, различной интенсивностью проявлений гидроморфизма.

Информация для построения цифровой модели рельефа (ЦМР) была получена в 1992 г. при проведении топографической съемки в масштабе 1:200 (рис.1, справа). Абсолютные отметки пикетов даны с точностью 1 см. Общая площадь площадки В1 равна 0.57 га, общее количество пикетов (с учетом всех деревьев) составляет 563. Отметки высот варьировали в диапазоне 155,75 – 154,52 м.

Радиометрическая съемка на площадке В1 для измерения плотности загрязнения Cs-137 с применением радиометра КОРАД выполнялась в 1993 г. по регулярной сетке 10x10 м в стандартной геометрии (рис.1, слева). Измерения пространственного распределения ¹³⁷Cs радиометром КОРАД с шагом 1 м были проведены в 2004 г. (рис. 2).

ГИС-моделирование выполнялось в программе SAGA (Conrad et al., 2015; версия 9.3.0).

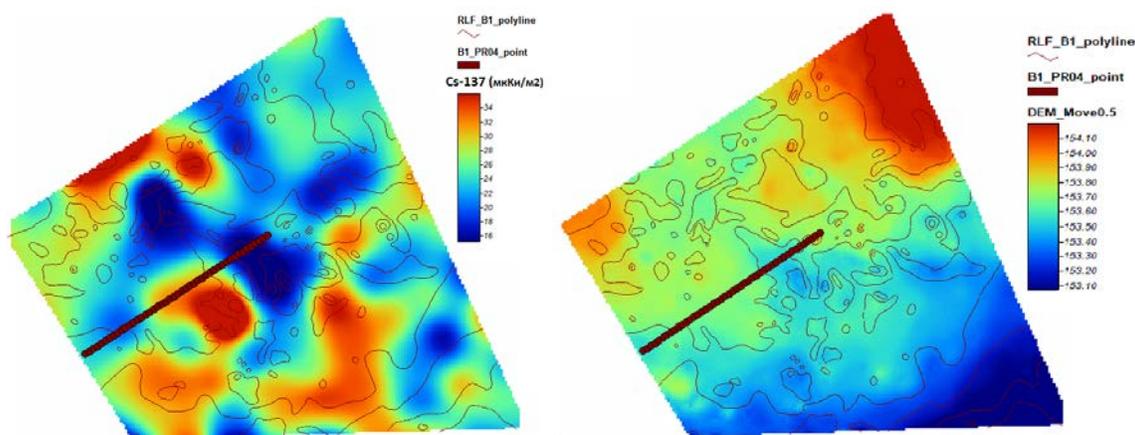


Рис. 1. Мониторинговая площадка В1 (размер 50x70 м). Плотность загрязнения почвы Cs-137 (мкКи/м²) по данным радиометрической съемки (сетка 10x10 м), выполненной в 1993 г. Отмечены точки измерений на радиометрическом профиле с шагом 1 м (2004 г.), а также высотные горизонталы (слева); цифровая модель рельефа (справа), построенная в масштабе 1:200. Отмечены точки радиометрического профиля и высотные горизонталы.

Результаты и обсуждение

Плотность загрязнения Cs-137 на площадке В1, измеренная в 1993 г., изменялась в диапазоне 14-42 мкКи/м². Анализ и объяснение «инверсионного» распределение Cs-137 в западинах в центральной части площадки рассмотрено в работе (Линник, 2018), тогда как геостатистический анализ распределения Cs-137 для результатов радиометрической съемки с различным шагом (10, 2 и 0,5 м) представлен в работе (Linnik, Saveliev, 2022).

Площадка В1 характеризуется особыми условиями миграции радионуклидов. На этой площадке выражен слабоволнистый рельеф с общим уклоном поверхности в южном и юго-восточном направлении (рис.1, справа), с отдельными микропонижениями размером до нескольких метров и глубиной 20-40 см, где в весенний период почвенные воды подступают прямо к поверхности почвы.

Особенности пространственного распределения микрорельефа формируют почвы с изменяющимся коэффициентом влагопроводности, т.е. способностью почвы пропускать ненасыщенный поток влаги, как результат действия градиента давления почвенной влаги. Этот градиент существенно различается в зависимости от интенсивности поверхностного стока и наполняемости микрозападин, где коэффициент влагопроводности принимает максимальные значения.

Гидрологическая связность поверхностного стока ¹³⁷Cs, который можно рассматривать как вариант латерального 2-D переноса, из таких западин в весенний период осуществляется по микропонижениям глубиной от нескольких сантиметров до десятка сантиметров. На рис.2 (расположение этого профиля отмечено на рис.1) представлены результаты радиометрической съемки с шагом 1 м. Обращает

внимание, что на участке профиля 32-35 м отмечено практически двукратное снижение запаса ^{137}Cs , связанное с его выносом водой. В рельефе этот участок относится к микропонижению, где мощность подстилки возрастает. Незначительные снижения запаса ^{137}Cs (в пределах десятка процентов), которые совпадают с локальными микропонижениями, прослеживаются в разных частях профиля на расстояниях 4, 21, 39-40 м.

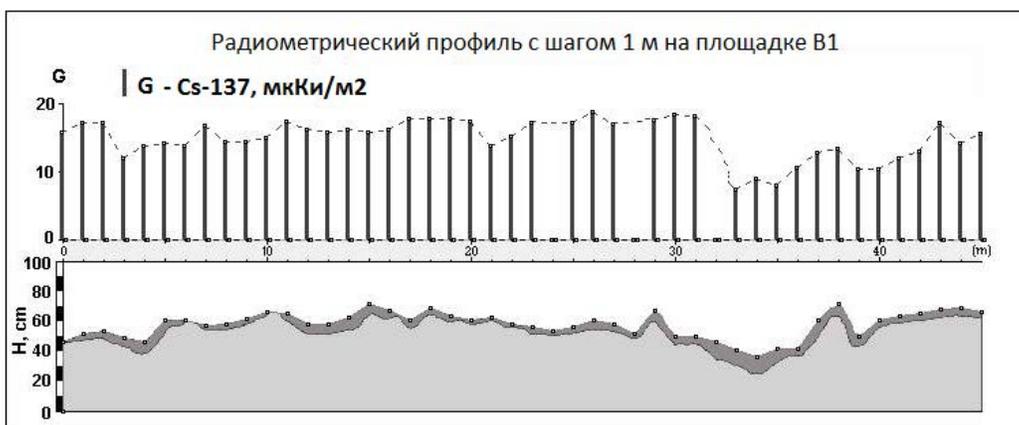


Рис. 2. Ландшафтно-радиометрический профиль с шагом 1 м (2004 г.). Расположение профиля отмечено на рис.1. Темно-серым цветом отмечена мощность подстилки, которая изменялась в пределах 2(3)-12 см.

Таким образом, анализ полученных на профиле данных показывает явное снижение запаса ^{137}Cs в тех точках профиля, которые совпадали с микропонижениями в рельефе.

Поскольку в этих частях профиля наблюдалось возрастание мощности подстилки, где на глубине 10-14 см залегал плотный перегнойный горизонт (выполняющий роль водоупора), то поверхностный сток при снижении обводненности площадки мог переходить во внутриподстилочный (Линник, 2018).

Следует особо подчеркнуть сезонность (эфемерность) процессов поверхностного стока, для формирования которых требуется особые условия полного влагонасыщения почвы, которые могут наблюдаться в весенний период после снеготаяния или после выпадения интенсивных осадков в летне-осенний период.

ГИС-моделирование рельефа позволяет выявить устойчивые (инвариантные) геоморфологические условия формирования поверхностного гидрологического стока. На рис.3 (слева) представлена карта углов наклона (в градусах) на площадке В1, которые варьируют в диапазоне 0,1-4,7°. Причем участки с максимальными углами уклона занимают небольшую площадь. Явно выраженной «ручейковой» сети не наблюдается.

На рис. 3 (справа, Catchment Area) представлен пример моделирования по данным ЦМР локальных микроводосборов на площадке В1. Данный показатель служит удобным индикатором, который демонстрирует, как происходит перераспределение выпавших на поверхность почвы атмосферных осадков (или весеннее снеготаяние), которые формируют поверхностный и внутрипочвенный сток. Обращает внимание множественность и локальность микробассейнов, когда формируемый поток поверхностной влаги достигает «насыщения», затем резко обрывается и не имеет дальнейшего продолжения на поверхности почвы. Такие участки служат индикаторами перехода поверхностного стока во внутрипочвенный.

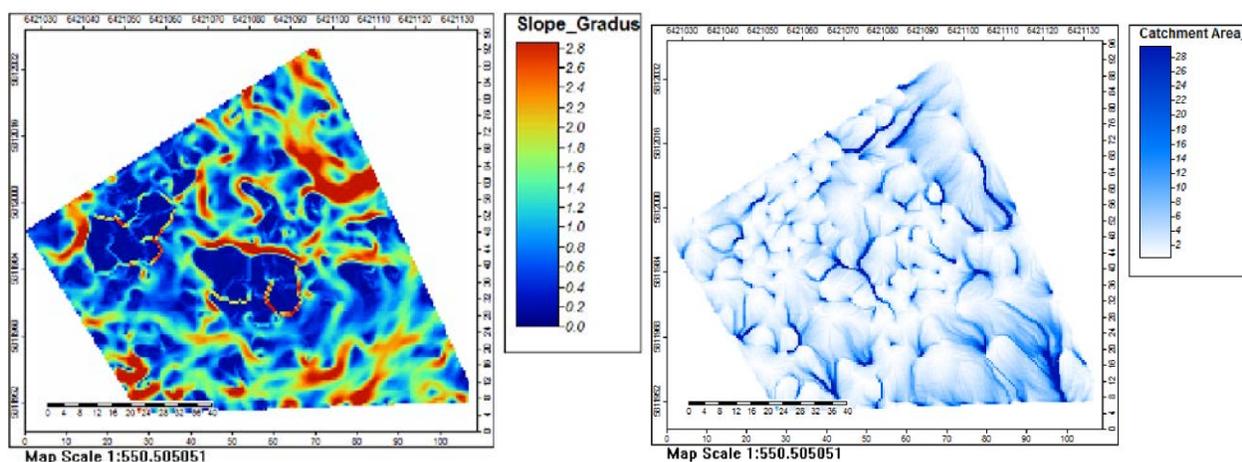


Рис. 3. Площадка В1. Карта углов наклона (слева, градусы); эфемерные микроводосборы (зоны формирования локального стока, справа SAGA GIS “Module Catchment Area (Top-Down)”)”

Эфемерные микроводосборы можно рассматривать как аналоги «преимущественным потокам влаги» (Шейн, 2010), только не в вертикальном, а в латеральном направлении. Это такие зоны, которые благодаря последовательному объединению локальных западин формируют непрерывную сеть влагопереноса на ландшафтном микро- и наноуровне.

Благодаря доступности ЦМР, геоморфометрические методы оказались эффективными в количественной оценке и параметризации явлений, связанных с движением воды в ландшафтах на поверхности Земли (Gruber, Peckham, 2009). Наиболее популярен топографический индекс влажности (TWI) (Beven and Kirkby, 1979) – морфометрический показатель, используемый для определения сети водотоков путем прогнозирования местоположения избыточного наземного стока. TWI позволяет рассчитать движение воды вниз по склону в зависимости от перепада высот и дренируемой площади водосбора: $TWI = \ln(\alpha / \tan \beta)$, где α - общая дренируемая водосборная площадь, деленная на ширину зоны выноса, β - градиент склона в ячейке сетки. TWI служит мерой накопления воды в ячейке сетки ЦМР.

При увеличении значения β наблюдается тенденция к снижению влаги, тогда как рост параметра α увеличивает значение параметра TWI.

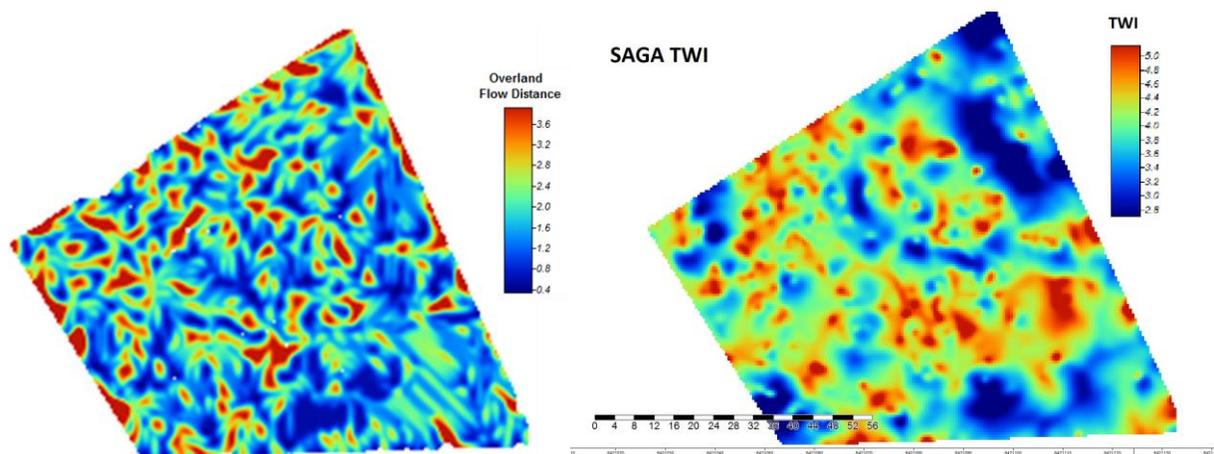


Рис. 4. Длина линий стока (Overland Flow Distance, слева); топографический индекс увлажнения (TWI, справа).

Длина линий тока (Overland Flow Distance) (рис.4, слева) характеризует протяженность микросклона (траектории потока поверхностной влаги), в зависимости от уклона склона в каждой ячейке. Эти значения следует рассматривать как меру потенциального латерального движения влаги на поверхности почвы в стационарных условиях в период максимального влагонасыщения. В дальнейшем поверхностный сток переходит во внутриподстилочный переток влаги в направлении максимальных градиентов гидравлической проводимости почвенных горизонтов.

На рис.4 (справа) представлено распределение значений показателя TWI. Пороговые значения TWI варьировались в диапазоне от $5,95^\circ$ до $2,8^\circ$. Минимальные значения отмечены для участков с максимальной крутизной на площадке В1 – $2,6-2,8^\circ$. Максимальные значения TWI ($4,6-5,0$) отмечены в зонах в западинах (зонах конвергенции латеральных потоков) в различных частях площадки, преимущественно в ее северной, западной и центральной частях. Минимальные значения TWI ($2,6-3,2$) отмечены на участках максимального выноса (северо-восточная и юго-восточная части площадки).

Топографический индекс увлажнения (TWI) характеризует процесс концентрации поверхностного стока (латерального переноса) результате слияния линий стока (тока) из различных участков ландшафта. Тем самым мы получаем интегральную оценку как для всего анализируемого водосбора, так и локальную его характеристику потенциального увлажнения в выбранной точке бассейна.

Выводы

Фундаментальная гидрологическая значимость рельефа – это возможность модельного определения тех участков, где быстрее всего происходит локальное насыщение почвы влагой и благодаря особенностям рельефа происходит движение воды вниз по склону в форме поверхностного или внутриводосборного (внутри подстилочного) стока (Tarboton, 2003).

В целом сток происходит по максимальному градиенту высот. Однако для площадки В1 существенную роль имеют микрозападины, которые до момента переполнения концентрируют влагу, которая впитывается в почву (до полного влагонасыщения), после переполнения западин «включается» латеральный перенос влаги. Тем самым формируется «эфемерный» сток, который в условиях полного влагонасыщения переходит в латеральный.

В целом для всей площадки В1 выявлена ярко выраженная анизотропия условий латерального переноса (на примере показателей Catchment Area и Overland Flow Distance), обусловленная строением общим уклоном рельефа (направление тренда) с севера на юг. Микрорельеф формирует определенные сочетания пространственных латеральных структур с различным режимом увлажнения: нитевидные, «пальчатые» и другие.

Благодарность

Финансирование работы выполнено в ГЕОХИ РАН согласно Госзаданию, а также при поддержке ВНИЛ Казанского университета "РНФ-22-184-ВП"

Литература

- Зайдельман Ф.Р. (2007) Причины образования светлых кислых элювиальных горизонтов в профиле почв. *Почвоведение*. №10. с.1155-1167.
- Линник В.Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов. М.:РАН. 2018. – 372 с.
- Шейн Е.В. (2010) Гидрология почв: этапы развития, современные тенденции, ближайшие перспективы. *Почвоведение*. №2. С.175-185.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. J.* 24, 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J., 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci. Model Dev.* 8, 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Farthing M.W., Ogden F.L. (2017). Numerical Solution of Richards' Equation: A Review of Advances and Challenges. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81:1257–1269 doi:10.2136/sssaj2017.02.0058
- Gruber, S., Peckham, S., 2009. Land-surface parameters and objects in hydrology. *Dev. Soil Sci.*, 171–194 [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00007-X).

- Linnik V.G., Saveliev A.A. The Heterogeneity and Spatial Correlation of the Cesium-137 Distribution in Forest Soil at the Microlandscape Level in Bryansk Oblast// *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2022. Vol. 77, No. 2, pp. 94–101. DOI: 10.3103/S0147687422020053
- Tarboton D.G. (2003) Rainfall-runoff processes. A workbook to accompany the Rainfall-Runoff Processes. Web Module. Technical Report. Utah State University. P.159. <https://hydrology.usu.edu/rrp/pdfs/RainfallRunoffProcesses.pdf>
- Western, A.W.A., Grayson, R.R.B., Willgoose, G.R., McMahon, T.A., 1999. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resour. Res.* **35**, 797–810. <https://doi.org/10.1029/1998WR900065>.

УДК 631.432.2:631.445.122

ВАРЬИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ В ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ ЗАБОЛОЧЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ ОСТРОВА САХАЛИН

Липатов Д.Н.¹, Манахов Д.В.¹, Щеглов А.И.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
dlip@soil.msu.ru; dman@soil.msu.ru; shcheglov@mail.ru

VARIATION OF DIFFERENT MOISTURE INDICATORS IN PEAT SOILS OF SWAMPY
ECOSYSTEMS IN THE NORTHEAST OF SAKHALIN ISLAND

Lipatov D.N.¹, Manakhov D.V.¹, Shcheglov A.I.¹

¹Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: The profile distribution was investigated and statistical estimates of spatial variation of moisture in peat soils and peat-gleezems were obtained. Moisture indicators were calculated for absolutely dry and wet mass, as well as the volume moisture of soils, were compared. The equations of linear regression of moisture are constructed depending on the ash content of the litter and peat horizons.

Введение

Заболоченные ландшафты накапливают большие запасы влаги, при этом вода в них аккумулируется торфяными и глеевыми горизонтами почв. Пространственное варьирование водных свойств почв в заболоченных экосистемах участвует в поддержании биоразнообразия их растительного покрова. В болотных ландшафтах могут происходить нарушения водного режима почв вследствие осушения, пожаров, трансформаций при строительстве антропогенных объектов. Техногенные воздействия ведут к изменению свойств болотных торфяных почв и торфяно-глееземов, развитию деградационных процессов. Мониторинг болотных угодий северного Сахалина необходим для сохранения гидрологических и экологических функций этих ландшафтов.

В почвоведении и прикладных исследованиях торфов используется несколько подходов для оценки влажности: определение процентного отношения воды на сухую и сырую массу почвы, а также расчет объемной влажности. Сопоставление этих показателей в рамках анализа пространственного варьирования влажности в торфяных почвах отдельных заболоченных экосистем является целью представленной работы.

Объекты и методы

Исследования проводились в Ногликском районе Сахалинской области, изучались болотные угодья и заболоченные леса в междуречье рек Ватунг и Оркуньи. На территории площадью 1 × 1 км были выбраны 4 площадки 50 × 50

метров. На всех четырех площадках были заложены почвенные разрезы, в них выполнялось морфологическое описание и отбор проб из почвенных горизонтов. Следует отметить, что к середине августа 2012 года, когда проводились полевые работы, на северо-востоке о. Сахалин был период летнего иссушения и понижения уровня почвенно-грунтовых вод, что позволило выкопать и исследовать разрезы в болотных и заболоченных экосистемах.

Для изучения пространственного варьирования на каждой из четырех площадок проводился пробоотбор по равномерной схеме опробования с шагом 10×10 м в 25 контрольных точках. В этих точках отбирались образцы из двух верхних горизонтов: подстилочного и нижележащего торфяного до глубины 25 см.

В ходе полевых исследований в каждой точке проводилось определение физических свойств торфяных почв. Вырезались монолиты подстилки площадью 20×20 см, торф отбирался буром с режущей кромкой диаметром 8.4 см. Отобранные монолиты и буровые образцы взвешивались для определения их массы в свежем состоянии. В ходе лабораторных исследований влажность и плотность оценивались термостатно-весовым методом: на основе взвешивания образца почвы в свежем состоянии и после высушивания (при температуре 105°C). В подстилочных и торфяных образцах определялась зольность с помощью озоления навесок в муфельной печи и прокаливания зольного остатка при температуре 540°C , в минеральных образцах измерялось содержание органического вещества почв (гумуса) методом Тюрина в модификации ЦИНАО.

Расчеты влажности образцов почв проводились тремя методами. В почвоведении общепринятым является вычисление влажности в процентах от массы абсолютно сухой почвы по формуле (Вадюнина, Корчагина, 1986):

$$W_S = \frac{m - m_c}{m_c} \times 100,$$

где W_S – процентное содержание воды, m – масса образца почвы до сушки, m_c – масса абсолютно сухого образца почвы.

В технических исследованиях торфов (ГОСТ 11305-2013) применяют вычисление влажности в процентах от массы торфа до сушки по формуле:

$$W_T = \frac{m - m_c}{m} \times 100,$$

где W_T – процентное содержание воды, m – масса образца торфа до сушки, m_c – масса абсолютно сухого образца торфа.

Кроме того, влажность может выражаться в процентах к объему почвы, ее называют объемной влажностью. Она вычисляется с использованием измеренного значения плотности почвы по следующей формуле (Вадюнина, Корчагина, 1986):

$$W_V = W_S \times d,$$

где W_V – влажность в процентах от объема почвы, W_S – влажность в процентах от абсолютно сухой массы почвы, d – плотность почвы, г/см^3 .

Результаты и обсуждение

Распределение влажности в профилях почв

На исследованной площадке № 1, расположенной в центральной части верхового болота, под пушицево-кустарничково-сфагновой растительной ассоциацией выявлена торфяная олиготрофная среднemocная почва. Самый верхний слой почвы представлен подстилочным горизонтом О, который состоит из очеса живых и отмерших растительных остатков, корней мхов и кустарничков, под ним залегают торфяные горизонты. Степень разложения торфа увеличивается вниз по почвенному профилю: горизонт ТО1 характеризовался слабой, горизонты ТО2, ТО3 – средней степенью разложения, ТО4 – сильноразложившийся торф.

В профиле торфяной олиготрофной среднemocной почвы наименьшее значение влажности отмечено в подстилке О. Распределение влажности W_s по торфяной толще достаточно равномерное и изменяется в диапазоне 604.4–686.9 %, небольшое увеличение отмечено в горизонтах ТО1 и ТО4, в подстилке влажность на 200 % меньше (табл. 1). Величина полной влагоемкости для верховых торфов составляет 1200–3000 % (Лиштван и др., 1989), но в естественном состоянии их влагосодержание меньше. Значения влажности торфяных горизонтов, зафиксированные в период летнего иссушения в горизонтах ТО1–ТО4 болотной торфяной олиготрофной почвы, соответствовали 20–40 % полной влагоемкости верховых торфов.

Профильное распределение, рассмотренное для показателя влажности торфа W_t , характеризуется еще большей равномерностью, чем для показателя W_s . На основе показателя объемной влажности W_v наблюдается выраженное увеличение от 38.9 % до 192.3 % сверху вниз по профилю исследованной торфяной олиготрофной среднemocной почвы (табл. 1).

На исследованной площадке № 2 в экосистеме заболоченного лиственничного леса отмечена торфяная олиготрофная глеевая почва, в которой суммарная мощность органогенных горизонтов менее 50 см (табл. 1). Торфяные горизонты этой почвы характеризуются ТО1 – средней и Тmg – сильной степенью разложения с примесью минеральной массы. Ниже торфяных залегают глеевый потечно-гумусовый горизонт G1hi мощностью около 15 см, который переходит в глеевые горизонты G2–CG.

В профиле торфяной олиготрофной глеевой почвы наибольшие показатели влажности зафиксированы в горизонте ТО1. При переходе от торфяной толщи к минеральным горизонтам влажность резко уменьшается и в глеевом горизонте CG достигает минимальных значений (табл. 1). При этом все три показателя влажности изменяются по профилю торфяной глеевой почвы достаточно сопряженно.

Таблица 1. Распределение показателей влажности, плотности, зольности и содержания гумуса в профилях исследованных почв

Горизонт	Глубина (см)	Показатели влажности (%)			Плотность (г/см ³)	Зольность (%)	Содержание гумуса (%)
		W _S	W _T	W _V			
Торфяная олиготрофная среднеспелая почва (площадка № 1)							
O	0–7	486.1	82.9	38.9	0.08	7.3	
TO1	7–23	676.3	87.1	108.2	0.16	2.4	
TO2	23–40	604.4	85.8	126.9	0.21	2.2	
TO3	40–73	618.6	86.1	148.5	0.24	2.1	
TO4	73–110	686.9	87.3	192.3	0.28	2.5	
Торфяная олиготрофная глеевая почва (площадка № 2)							
O	0–6	470.5	82.5	28.2	0.06	16.3	
TO1	6–26	525.2	84.0	63.0	0.12	6.8	
TO2mr	26–49	268.1	72.8	56.3	0.21	18.6	
G1hi	49–65	43.7	30.4	35.8	0.82		9.59
G2	65–82	30.9	23.6	38.6	1.25		3.70
CG	82–120	27.3	21.4	37.1	1.36		0.82
Пирогенная торфяная олиготрофная глеевая почва (площадка № 3)							
Opir	0–8	465.2	82.3	23.3	0.05	6.9	
TOpir	8–28	337.4	77.1	60.7	0.18	14.3	
G1hi_pir	28–40	66.2	39.8	48.3	0.73		7.55
G2hi	40–58	46.9	31.9	54.4	1.16		2.74
G3f	58–75	35.7	26.3	40.0	1.12		1.19
G4	75–95	29.6	22.8	34.3	1.16		0.84
CG	95–105	25.3	20.2	30.6	1.21		0.72
Торфяно-глеезем потечно-гумусовый (площадка № 4)							
O	0–7	239.5	70.5	14.4	0.06	14.2	
Tmr	7–15	345.4	77.5	110.5	0.32	35.3	
G1hi	15–31	57.4	36.5	40.8	0.71		6.66
G2hi,f	31–43	36.9	27.0	30.6	0.83		1.88
G3f	43–64	31.6	24.0	31.0	0.98		0.28
G4	64–91	35.0	25.9	41.3	1.18		0.26
CG	91–110	36.5	26.7	47.8	1.31		0.28

На площадке № 3 описана пирогенная торфяная олиготрофная глеевая почва, сформировавшаяся в результате пожаров, проходивших на этом болотном угодье 30–50 лет назад. Вследствие выгорания торфа органическая толща этой почвы значительно укорочена. В профиле пирогенной почвы отмечены фрагментарные прослои золы, как в подстилке, так и в верхних торфяных и минеральных горизонтах. Под пирогенным горизонтом TOpir залегает глеевый потечно-гумусовый горизонт, верхняя часть которого (гор. G1hi_pir) также имеет признаки

пирогенеза. В гор. G3f отмечены железисто-марганцевые стяжения и конкреции, он переходит в глеевые гор. G4–CG.

В профиле пирогенной торфяной олиготрофной глеевой почвы наибольшие показатели влажности W_S и W_T отмечаются в подстилке, тогда как показатель объемной влажности в ней минимален. Пирогенный горизонт Trig по показателям влажности сходен с горизонтом Tmg торфяной глеевой почвы (табл. 1). В потечно-гумусовом Ghi и нижележащих глеевых горизонтах показатели влажности постепенно уменьшаются.

На площадке № 4 в экосистеме заболоченного лиственничного леса описан торфяно-глеезем потечно-гумусовый. В этой почве горизонт O представлен слабоотторфованной лесной подстилкой. Маломощный торфяной горизонт Tmg имел примесь минерального материала и характеризовался сильной степенью разложения. Ниже него сформированы глеевый потечно-гумусовый и глеевый ожелезненный горизонты, между ними выделен переходный горизонт. Ожелезнение диагностировано по наличию ржаво-охристых стяжений и конкреций.

В исследованном профиле торфяно-глеезема наибольшие показатели влажности зафиксированы в горизонте Tmg (табл. 1). Наименьшая влажность отмечена в ожелезненном горизонте G3f, и может указывать на его более сильное иссушение по сравнению с другими минеральными горизонтами. Во всех четырех исследованных профилях почв влажность резко уменьшалась при переходе к глеевым горизонтам. По всей глубине выполненных 1-метровых разрезов не отмечено выходов грунтовых вод, фиксировались лишь локальные выклинивания верховодки в нижней части торфяной толщи. В условиях летнего иссушения влажность W_S в горизонте Ghi составляла 43.7–57.4 %, в горизонте Gf уменьшалась до 31.6–35.7 %, в горизонтах G–CG – до 25.3–36.5 %.

Пространственное варьирование влажности почв на площадках

Показатель влажности W_S , рассчитанный по принятой в почвоведении формуле, изменялся в очень широком диапазоне, размах варьирования в пределах 50-метровых площадок составил более 500 % (табл. 2), отражая неравномерность иссушения верхних горизонтов торфяных почв. Размах значений влажности в горизонте O больше, чем в подподстилочных горизонтах.

Наиболее высокие значения влажности характерны для горизонта TO1 торфяной олиготрофной среднемощной почвы. В горизонтах Trig, Tmg влажность меньше, чем в TO1. В торфяных глеевых, пирогенных почвах и торфяно-глееземах влажность в подстилочных горизонтах O, Orig больше, чем в подподстилочных TO1, Trig, Tmg (табл. 2).

Коэффициенты вариации влажности W_S , полученные для верхних горизонтов торфяных почв составили 19.6–69.0 %. Такие коэффициенты вариации влажности больше установленных в почвах автоморфных ландшафтов (Орешкина, 1988). Для

влажности в горизонте TO1 торфяной олиготрофной среднemocной почвы на площадке № 1 коэффициент вариации гораздо меньше, чем в верхних горизонтах торфяных глеевых почв и торфяно-глееземов, в которых, по-видимому, иссушение проходит неравномерно вследствие значительной пространственной неоднородности горизонтов T_{pir}, T_{mr}.

Таблица 2. Статистические характеристики пространственного варьирования показателей влажности в верхних горизонтах исследованных почв

Показатели	W _S (%)		W _T (%)		W _V (%)	
Торфяная олиготрофная среднemocная почва на площадке № 1 (n=25)						
Горизонт	О	TO1	О	TO1	О	TO1
Среднее	461.4	575.3	81.1	84.8	29.2	74.3
Минимум	285.0	387.7	74	79.5	11.6	53.3
Максимум	926.4	850.3	90.3	89.5	56.3	85.9
Стандартное отклонение	161.1	112.6	4.3	2.4	10.1	8.7
Коэффициент вариации, %	34.9	19.6	5.3	2.8	34.8	11.7
Коэффициент асимметрии	1.7	0.9	0.3	0.0	0.7	-1.1
Коэффициент эксцесса	3.4	0.7	-0.3	0.2	1.0	0.3
Нормальный закон распределения	Нет	Да	Да	Да	Да	Нет
Торфяная олиготрофная глеевая почва на площадке № 2 (n=25)						
Горизонт	О	TO1	О	TO1	О	TO1
Среднее	518.0	440.9	79.5	76.8	22.7	59.3
Минимум	113.0	88.8	53.0	47.0	8.4	29.2
Максимум	1049.3	802.9	91.3	88.9	40.0	76.1
Стандартное отклонение	290.1	218.0	10.5	13.1	9.4	10.0
Коэффициент вариации, %	56.0	49.4	13.1	17.0	41.6	16.9
Коэффициент асимметрии	0.4	-0.3	-0.9	-1.3	0.4	-1.1
Коэффициент эксцесса	-1.1	-1.1	0.1	0.2	-0.9	2.1
Нормальный закон распределения	Да	Да	Нет	Нет	Да	Да
Пирогенная торфяная олиготрофная глеевая почва на площадке № 3 (n=25)						
Горизонт	O _{pir}	T _{pir}	O _{pir}	T _{pir}	O _{pir}	T _{pir}
Среднее	515.4	364.0	82.7	70.8	26.7	69.1
Минимум	253.4	34.1	71.7	25.4	2.3	37.9
Максимум	851.5	658.5	89.5	86.8	48.9	86.5
Стандартное отклонение	148.4	199.6	4.6	20.3	12.2	14.8
Коэффициент вариации, %	28.8	54.8	5.6	28.7	45.8	21.4
Коэффициент асимметрии	0.0	-0.3	-0.9	-1.4	-0.0	-0.9
Коэффициент эксцесса	-0.5	-0.9	0.0	0.4	-0.5	-0.4
Нормальный закон распределения	Да	Да	Нет	Нет	Да	Нет
Торфяно-глеезем потечно-гумусовый на площадке № 4 (n=25)						
Горизонт	О	T _{mr}	О	T _{mr}	О	T _{mr}
Среднее	376.9	254.0	76.7	65.1	26.7	58.5
Минимум	118.0	69.8	54.1	41.1	11.5	37.5

Максимум	665.4	606.6	86.9	85.8	46.6	88.9
Стандартное отклонение	154.3	175.1	8.0	14.8	9.7	12.0
Коэффициент вариации, %	40.9	69.0	10.4	22.8	36.3	20.5
Коэффициент асимметрии	0.6	0.8	-1.0	0.0	0.6	0.5
Коэффициент эксцесса	-0.6	-0.8	1.4	-1.4	-0.6	0.5
Нормальный закон распределения	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да

В большинстве почвенных горизонтов для влажности W_s подтвержден нормальный закон распределения. Проверка нормального закона распределения проводилась с помощью критерия Уилка-Шапиро ($p=0.05$). Высокий положительный коэффициент асимметрии и отличие распределения от нормального закона выявлены для горизонтов O торфяной олиготрофной почвы и Tmг торфяно-глеезема. Максимальные значения влажности отмечаются в точках, приуроченным к микропонижениям рельефа. Минимальные значения влажности, ниже 100 %, отмечены в морфонах горизонтов Trг и Tmг с высокой степенью разложения торфа и примесью минеральной массы.

Для варьирования показателя влажности W_T , рассчитанного по формуле, используемой в прикладных исследованиях торфов, характерны низкие коэффициенты вариации. Вместе с тем, для распределений этого показателя влажности в торфяных глеевых, пирогенных почвах и торфяно-глееземах отмечены отрицательные коэффициенты асимметрии и отличие от нормального закона (табл. 2).

Зафиксированные средние значения показателя объемной влажности W_V в горизонтах подстилки O были в 2–3 раза меньше, чем в подподстилочных торфяных горизонтах TO1, Trг, Tmг. При этом коэффициенты вариации объемной влажности W_V в подстилках значительно выше, чем в соответствующих им подподстилочных горизонтах (табл. 2). Пространственное распределение объемной влажности подчинялось нормальному закону в большинстве исследованных верхних горизонтов торфяных почв и торфяно-глееземов. Значительная отрицательная асимметрия и отличие от нормального закона зафиксированы для объемной влажности в горизонтах TO1 на площадке № 1 и Trг на площадке № 3.

В целом, статистические характеристики варьирования трех изученных показателей влажности W_s , W_T , W_V проявляют различные тенденции несмотря на то, что определяются одними и теми же природными факторами.

Уравнения линейной регрессии между влажностью и зольностью почв

На основе результатов, полученных при анализе пространственного варьирования влажности и зольности в верхних горизонтах почв, проводился корреляционный анализ с помощью коэффициентов корреляции Пирсона ($p=0.05$).

Для показателей со статистически значимой корреляцией построены уравнения линейной регрессии следующего вида:

$$W (\%) = a + b \times \text{Зольность} (\%),$$

где W – показатель влажности, a и b – параметры уравнения линейной регрессии, подобранные методом наименьших квадратов.

Результаты корреляционного анализа показывают, что для многих горизонтов зафиксированы статистически значимые отрицательные коэффициенты корреляции между показателями влажности и зольностью (табл. 3). С увеличением зольности уменьшается влажность верхних горизонтов торфяных почв и торфяно-глееземов. Наиболее сильное влияние зольности проявляется на влажность верхних торфяных горизонтов T_{mr} , T_{pr} , $TO1$. В горизонтах подстилки O связь между зольностью и влажностью проявляется в меньшей степени, это связано с различным растительным составом очеса, в котором могут преобладать не только остатки сфагнума, но и кустарничков, в частности багульника болотного, и других растений.

Для объемной влажности W_V выявлено меньшее количество статистически значимых отрицательных коэффициентов корреляции с зольностью по сравнению с показателями W_S и W_T , рассчитанными на массу почвенных образцов. По-видимому, это обусловлено тем, что плотность почвы проявляет положительную корреляционную связь с зольностью, и это косвенно снижает ее обратную взаимосвязь с объемной влажностью.

Полученные уравнения линейной регрессии характеризуют пространственную изменчивость показателей влажности в широком диапазоне варьирования зольности, зафиксированных на контрольных площадках № 1–4 (табл. 3) в различных типах почв исследованных заболоченных экосистем. Представленные результаты регрессионного анализа применимы для торфяных горизонтов почв северо-восточного Сахалина. Статистический анализ пространственной сопряженности зольности и показателей влажности помогает выявлять закономерности процессов водного режима в исследованных типах болотных почв.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции и параметры линейных регрессионных моделей между показателями влажности и зольностью верхних горизонтов исследованных почв

Горизонт	Диапазон зольности (%)	Показатель влажности	Коэффициент корреляции Пирсона	Уравнение линейной регрессии		
				Параметр a	Параметр b	Коэффициент детерминации R^2
Торфяная олиготрофная среднemocная почва на площадке № 1						
O	2.2–25.4	W_S	–0.19	–	–	–
		W_T	–0.05	–	–	–
		W_V	–0.09	–	–	–
TO1	2.9–7.7	W_S	–0.63*	882.5	–70.2	0.37
		W_T	–0.68*	91.7	–1.6	0.43

		W_V	-0.30	-	-	-
Торфяная олиготрофная глеевая почва на площадке № 2						
O	3.9–30.8	W_S	-0.48*	696.4	-20.8	0.19
		W_T	-0.62*	87.9	-1.0	0.35
		W_V	-0.44*	28.1	-0.6	0.16
TO1	5.5–39.4	W_S	-0.90*	646.4	-7.1	0.80
		W_T	-0.95*	89.9	-0.5	0.91
		W_V	-0.35	-	-	-
Пирогенная торфяная олиготрофная глеевая почва на площадке № 3						
Opir	3.9–22.7	W_S	-0.54*	670.0	-21.9	0.26
		W_T	-0.62*	88.3	-0.8	0.35
		W_V	-0.27	-	-	-
Tpir	3.1–91.4	W_S	-0.87*	487.9	-5.2	0.75
		W_T	-0.99*	85.0	-0.6	0.98
		W_V	-0.89*	78.5	-0.4	0.79
Торфяно-глеезем потечно-гумусовый на площадке № 4						
O	4.8–8.8	W_S	-0.55*	986.2	-85.8	0.27
		W_T	-0.50*	106.4	-4.2	0.22
		W_V	-0.55*	69.0	-6.0	0.27
Tmr	6.4–86.5	W_S	-0.97*	551.4	-5.9	0.94
		W_T	-0.96*	90.1	-0.5	0.93
		W_V	-0.42*	67.4	-0.2	0.15

Выводы

1. На северо-востоке острова Сахалин в период летнего иссушения болотных угодий влажность верхних горизонтов торфяных олиготрофных почв может уменьшаться в 2.5–5 раз от их полной влагоемкости. В вертикальных профилях значения влажности значительно уменьшаются при переходе от торфяной толщи к глеевым горизонтам.

2. Коэффициенты вариации влажности в верхних горизонтах возрастают в ряду: торфяные олиготрофные среднемощные, торфяные глеевые почвы, торфяно-глееземы от 19.6 % до 69.0 %. Распределение влажности в горизонтах O, TO1, Opir, Tpir удовлетворяет нормальному закону, тогда как в горизонте Tmr не удовлетворяет.

3. Пространственное распределение показателя влажности W_S в торфяных почвах часто характеризуется положительными, а показателя влажности W_T – отрицательными коэффициентами асимметрии.

4. Объемная влажность W_V в подстилочных горизонтах O в 2–3 раза меньше, чем в подподстилочных торфяных TO1, Tpir, Tmr. При этом коэффициенты вариации объемной влажности в подстилках значительно выше, чем в соответствующих им подподстилочных горизонтах.

5. С помощью корреляционного анализа установлено, что с увеличением зольности уменьшается влажность верхних горизонтов торфяных почв и торфяно-глееземов. Наиболее сильное влияние зольности проявляется на влажность верхних торфяных горизонтов T_{mr}, T_{pr}, TO₁.

Благодарность

Работа осуществлена в рамках НИОКТР № АААА-А21-121012290189-8, выполняемой по государственному заданию и при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В.Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Литература

- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. (1986) Методы исследования физических свойств. М.: Агропромиздат, 416 с.
- ГОСТ 11305-2013: Торф и продукты его переработки. Методы определения влаги. (2014) М.: Стандартиформ, 6 с.
- Лиштван И.И., Базин Е.Т., Гамаюнов Н.И., Терентьев А.А. (1989) Физика и химия торфа. М.: Недра, 304 с.
- Орешкина Н.А. (1988) Статистические оценки пространственной изменчивости свойств почв. М: Изд-во МГУ, 112 с.

УДК 631.42

ПОЧВА КАК НАЗЕМНОЕ БИОКОСНОЕ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОЕ «ПОТОКОВОЕ» ТЕЛО, НЕЛИНЕЙНО ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЕ ВО ВРЕМЕНИ И В ПРОСТРАНСТВЕ

Макаров О.А.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
oa_makarov@mail.ru

SOIL AS A GROUND BIO-INDUCED ELASTOVISCO-PLASTIC “FLOW” BODY,
NONLINEARLY FUNCTIONING IN TIME AND IN SPACE

Makarov O.A.
Soil Science Faculty of MSU

Annotation. The elastic-viscoplastic “character” of soil is one of the reasons for their “nonlinear behavior” in time and space. Almost all types of nonlinear dynamic behavior have been discovered for soils. Different soil formation factors in different cases have not only different directions of action in space, but also different “strengths”.

Введение

Как известно, почва как объект изучения (математического моделирования, в том числе) обладает определенными особенностями - высокой сложностью и иерархичностью строения, незамкнутостью, полифакторностью внешней среды, целостностью, динамичностью, нестационарностью, инерционностью – и нелинейностью в том числе. При этом нелинейность почвы является следствием «нелинейного характера подавляющего большинства её внутренних и внешних связей» (Рыжова, 1987, С. 27).

Внутренние связи обуславливают взаимодействие между элементарными почвенными частицами (ЭПЧ), микро-и макроагрегатами, формируют поровое пространство и трещинную сеть почвы. Внешние связи проявляются через влияние силы тяжести Земли и «традиционных» факторов почвообразования (климата, рельефа, почвообразующих пород, биоты, антропогенеза), действующих во времени на почву, а также – через осуществление почвой экологических функций/экосистемных сервисов в наземных экосистемах.

Следствием напряжений и деформаций почв, возникающих под действием указанных «внутренних» и «внешних» сил («внутренних» и «внешних» нагрузок) является их пластичность. Почвы, как известно, относятся к упруговязкопластичным телам, так как обладают упругостью (характерной для твердых тел), вязкостью (характерной для жидких тел) и пластичностью (способностью сохранять

остаточные, или пластические, деформации) (Чигарев, Синкевич, 2004). Таким образом, почва в ходе своего функционирования подвергается значительному количеству разнообразных напряжений и деформаций, которые приводят к перемещению почвенной массы, как внутри профиля на расстояние, составляющее максимум несколько десятков сантиметров (биотурбация и другие процессы), так и на значительные расстояния (десятки, сотни и тысячи метров, километры) в результате эрозионных процессов. Представление о почве, почвенном покрове как о достаточно консервативном природном объекте, где свойства «почва-памяти» абсолютно преобладают над свойствами «почва-момента», где длительная (минимум, -тысячелетняя) эволюция происходит под влиянием факторов почвообразования, также слабо меняющихся во времени, наверное, слишком «идеалистично». В реальности, почва, почвенный покров – постоянно меняющаяся, во многом – биогенная, масса, непрерывно «ползущая» вниз под действием силы тяжести и «распираемая» «внутренними» турбационными процессами.

Целью проведенных исследований явилась оценка «нелинейного поведения» почв во времени и в пространстве как результата проявления «нелинейного характера» их внутренних и «внешних» связей.

Объекты и методы

Для определения «нелинейного поведения» почв были проанализированы ряды эволюции почв, предложенные В.О. Таргульяном (2019), фрагменты почвенной карты Московской области 1975 г. (Масштаб 1 :500 000) и 1985 г. (1: 300 000), концепция стрийальности (полосчатости) почвенного покрова (Соколов, 2004).

Исследования «нелинейности» почв и почвенного покрова проводилось с привлечением матрицы напряжения и деформации почв (Чигарев, Синкевич, 2004), методов анализа нелинейного динамического поведения почв, графического изображения «лоскутного» характера почвенного покрова, методов оценки расчлененности территории овражно-балочной сетью на региональных почвенных картах.

Результаты и обсуждение

Напряжения и деформации в почве, обусловленные действием силы тяжести, приводящей к вертикальному и/или латеральному перемещению отдельных частиц, веществ и почвенных блоков например, в результате почвенной эрозии), макро-и микропроцессов почвообразования (включая зоотурбацию), проявляются в характере функционирования почв во времени и в пространстве.

Нелинейное функционирование во времени

Упруговязкопластичность почв порождает способность их постепенного перехода из одного состояния в другое с течением времени. Все процессы,

происходящие в почвах, имеют «накопительный эффект», когда одно равновесное/квазиравновесное состояние переходит в другое равновесное/квазиравновесное состояние через так называемое «характерное» время, и постепенно почвообразующая порода («литоматрица») преобразуется в «педоматрицу» - развитый, «зрелый», почвенный профиль (Таргульян, 2019) – рис. 1.

При этом упруговязкопластичность почв обуславливает все виды их нелинейного динамического поведения –

а) мультистабильность (например, сезонные циклы развития почвенной биоты «дают» впоследствии колебательные сезонные циклы гумусообразования);

б) угасание амплитуды (например, цикл за циклом происходит выветривание минеральной массы почвы, но постепенно активность процессов трансформации почвенных минералов замедляется, так как доля «способных» к выветриванию в данных термодинамических условиях минералов сокращается и в какой-то момент сходит на нет);

в) солитоны, или одиночная самоусиливающаяся волна – возможный сценарий нелинейного динамического поведения почвы в том случае, когда увеличивающаяся амплитуда изменения одного свойства почвы (например, рост сезонной динамики температуры поверхности почвы) не приводит к изменению циклов других почвенных свойств (выветриванию минералов в том случае, если выветривание в основном уже произошло при прошлых климатических параметрах).



Рис. 1. Схема эволюции почв, опирающаяся на представление о характерном времени.

Нелинейное функционирование в пространстве

И.А. Соколов (2004) убедительно показал, что широтная зональность является частным случаем проявления полосчатости, или стрийности (*stria* — лат. полоса),

почвенного покрова. Он ввёл понятия рефлекторности почв (вытекающей из докучаевского определения их способности воспринимать воздействие факторов почвообразования и отражать это воздействие в своих свойствах) и рефлекторности почвенного покрова (способности почвенного покрова любой территории отражать в составе и распределении компонентов пространственное разнообразие факторов почвообразования на этой территории). В зависимости оттого, какой фактор вызывает стриальность, можно выделять климастриальность, фитостриальность, литостриальность, топостриальность, хроностриальность. — различиями в возрасте почв. Соответственно можно выделять климагенные почвенные полосы и фито-, лито-, топо-, хроногенные почвенные полосы (стрии). Очевидно, что направленное изменение в пространстве какого-либо фактора почвообразования (например, климатического), выражающегося в последовательном увеличении температуры атмосферного воздуха при движении от полюса к экватору и формирующего таким образом термические пояса, может приводить к образованию почвенной «полосы» (стрии), расположенной, как правило, перпендикулярно направлению изменения температуры. Если по какой-то причине направление действия «термического» фактора меняется, то (при остальных «равных» условиях почвообразования) меняется и направление пространственного простиранья климатогенной почвенной стрии (в частности, так проявляются региональные, в том числе, - фациальные особенности почвенного покрова).

Очевидно, что направленное изменение в пространстве какого-либо фактора почвообразования (например, климатического), выражающегося в последовательном увеличении температуры атмосферного воздуха при движении от полюса к экватору и формирующего таким образом термические пояса, может приводить к образованию почвенной «полосы» (стрии), расположенной, как правило, перпендикулярно направлению изменения температуры. Однако, действие даже «термического» фактора почвообразования не так очевидно, так как повышение температуры при движении от полюсов к экватору происходит неравномерно, то есть, - нелинейно. В экваториально-тропических широтах это изменение происходит медленно, здесь температурный градиент мал, изотермы разрежены. В умеренных широтах, особенно на 40-60°, изменение идет довольно быстро. Здесь горизонтальный градиент температуры значительный, поэтому изотермы сближены, сгущены. В высоких широтах температура вновь изменяется медленно, благодаря чему изотермы разрежены. Таким образом, неравномерный (нелинейный) характер термических поясов априори создаёт условия для формирования почвенных полос (зон) различной ширины.

На распространение почв по поверхности почв по поверхности Земного шара влияет не один, а несколько факторов одновременно (пространственная изменчивость почвообразующих пород, растительности, неодинаковые

орографические, макро- и микроклиматические условия, наконец, - направленное действие антропогенного фактора). Совершенно очевидно, что указанные факторы/аргументы/предикторы почвообразования, при всей своей одинаковой значимости для почвообразовательного процесса в целом, в разных случаях обладают не только, как было показано выше, разной направленностью, но и разной «силой» (величиной градиента изменения в пространстве). По сути, мы имеем дело с различными векторами «силы» почвообразования, каждый из которых имеет своё «скалярное» значение.

В значительном количестве случаев, чем больше скорость изменения скалярной величины силы при движении в пространстве (например, - при движении от полюсов к экватору), тем сильнее изменяются характеристики почвенного покрова (например, - ширина почвенной полосы уменьшается). Вообще, это соотношение (между скоростью изменения скалярной величины фактора/аргумента/предиктора почвообразования в пространстве и скоростью изменения почвенного таксона при том же самом движении) можно выразить формулой (1):

$$\frac{|d\vec{F}f|}{dx} = k \frac{|d\text{tax}|}{dx}, \quad (1)$$

где

$|d\vec{F}f|$ - модуль (скалярное значение) изменения фактора/аргумента/предиктора почвообразования;

dx – изменение («приращение») пространства вдоль определенной линии;

$|d\text{tax}|$ - модуль изменения почвенного таксона;

k – коэффициент пропорциональности.

Активно пропагандировавшийся И.Н. Степановым (1986) в 80-х-90-х годах прошлого века метод картографирования почв, когда границы между почвенными контурами предлагается проводить по морфоизографам (границам между понижениями и повышениями), во многом справедливо критиковался. Так, абсолютизация морфоизограф привела к определенной некорректности анализа структуры почвенного покрова то или иной территории, несколько исказила представления о ландшафтной структуре местности.

В тоже время построение почвенной карты по морфоизографам позволяет определять места возникновения, транзита и аккумуляции водного стока. Так, видна существенная разница между почвенными картами Московской области, составленными традиционным способом (карта 1976 г.) и методом пластики рельефа (карта 1985 г.). На среднемасштабной карте 1985 г. отчетливо обозначена овражно-балочная сеть, почвенный покров которой представлен комплексами смыто-намытых почв. На среднемасштабной карте 1976 г. видны округлые контуры почв, как правило, совпадающие с изогипсами; должного отображения

значительных масштабов эрозионных процессов для территории, относящейся к Клинско-Дмитровской гряде, мы не получаем.

Таким образом, метод «пластики рельефа» помогает эрозиоведам изучать характер и масштабы проявления эрозионных процессов на местности, «подчеркивая» упруговязкопластичность почвенных тел, испытывающих напряжения и деформации, обусловленные механическим воздействием движущейся воды. В определенном смысле, почвы являются постоянно «текущими» («поточковыми») телами, обладающими значительными динамическими свойствами. При составлении почвенной карты, изучении отдельных почвенных свойств фиксируется некое «статичное» состояние, которое не повторится уже никогда.

Выводы

Показано, что следствием напряжений и деформаций почв, возникающих под действием различных «внешних» и «внутренних» нагрузок, является их пластичность. Почва в ходе своего функционирования подвергается значительному количеству разнообразных напряжений и деформаций, которые приводят к перемещению почвенной масс, как внутри профиля на расстояние, составляющее максимум несколько десятков сантиметров, так и на значительные расстояния в ходе эрозионных процессов.

Упруговязкопластичный «характер» почвы является одной из причин их «нелинейного поведения» во времени и в пространстве. Так, для почв обнаружены практически все виды нелинейного динамического поведения – мультистабильность, угасание амплитуды, солитоны. Различные факторы почвообразования, при всей своей одинаковой значимости для почвообразовательного процесса в целом, в разных случаях обладают не только, разной направленностью действия в пространстве, но и разной «силой» (величиной градиента изменения в пространстве).

Метод «пластики рельефа» помогает эрозиоведам изучать характер и масштабы проявления эрозионных процессов на местности, «подчеркивая» упруговязкопластичность почвенных тел, испытывающих напряжения и деформации, обусловленные механическим воздействием движущейся воды.

Литература

Почвенная карта Московской области (1985 г.), Масштаб 1: 1 300 000/Под редакцией А.И. Саталкина. Государственный агропромышленный комитет РСФСР, Всероссийское производственное проектное объединение по использованию земельных ресурсов, Центральный проектный институт по землеустройству.

- Почвенная карта Московской области (1976), Масштаб 1: 1 500 000// Атлас Московской области, 1976 г., Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. Атлас подписан к печати 04.11.1976 г.
- Рыжова И. М. (1987) Математическое моделирование почвенных процессов. — издательство Московского университета Москва, 82 с.
- Соколов И.А. (2004) Современные проблемы генетического почвоведения. Новосибирск: Гуманитарные технологии, 288 с.
- Степанов И.Н. (1986) Формы в мире почв. М.: Наука, 192 с.
- Таргульян В.О. (2019) Теория педогенеза и эволюции почв. Издательство: ГЕОС, 295 с.
- Чигарев Ю.В., Синкевич П.Н. (2004) Математические основы механики почв. Учебное пособие. — Мн.: Технопринт, 164 с.

УДК 631.4

ПРОФИЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОЧВ В БЕРЁЗОВО-ЕЛОВОМ ЛЕСУ УОПЭЦ МГУ «ЧАШНИКОВО»

Манакова О.И.¹, Сорокин А.С.¹, Мешалкина Ю.Л.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
Oliamanakova@yandex.ru

SOIL BULK DENSITY PROFILE DISTRIBUTION IN THE BIRCH-SPRUCES FOREST OF
THE TRAINING AND EXPERIMENTAL SOIL ECOLOGICAL CENTER
“CHASHNIKOVO”

Manakova O.I., Sorokin A.S., Meshalkina J.L.
Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: Soil bulk density measurements in two replications were performed in five experimental sites in a birch-spruce forest near TESEC “Chashnikovo” (Moscow region).

Введение

Плотность почвы является фундаментальной физической величиной, которая широко используется в почвоведении для оценки соотношения между твердой, жидкой и газообразной фазами, расчета пористости, запасов питательных веществ и гумуса, оценки сложения почвы и других почвенно-экологических, агрофизических характеристик.

Варьирование плотности оказывает влияние на итоговую неопределённость получаемых результатов при расчетах запасов гумуса. Однако данные такого рода мало представлены в научной литературе, что становится проблемой для исследователей (Честных, Замолодчиков, 2004).

В научной литературе наиболее представлены значения плотности верхних гумусовых горизонтов. Так, типичными значениями для пахотных суглинистых почв приняты 0.8 – 1.4 г/см³, а для почв природных ландшафтов – 0.8 – 1.2 г/см³ (Шеин, 2005). Текстурные горизонты и материнские породы характеризуются значениями плотности от 1.5 до 1.8 г/см³.

На территории Учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ имени М.В.Ломоносова долгое время проводятся комплексные исследования биогеоценозов центральной России. Полученные данные о плотности почв будут использованы при решении различных задач в рамках программы «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов» (рег. № 123030300031-6), а также в других проектах.

Задача исследования состояла в том, чтобы изучить варьирование плотности дерново-подзолистой почвы на разных глубинах в пределах одного биогеоценоза, представленного вторичным березового-еловым лесом.

Объекты и методы

Объекты

Исследования проводились на базе Учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ имени М.В.Ломоносова. К северу от посёлка Красный Воин были заложены пять пробных площадок (ПП) 50x50 метров, которые являются идентичными друг другу пробными площадями, расположенными на площади около 2 га, центры которых находятся на расстоянии 150–200 метров друг от друга (координаты центра 56.031268 с.ш. и 37.200576 в.д.).

Растительность территории представлена вторичным берёзово-еловым лесом с подростом клёна и липы, в напочвенном покрове преобладают кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.), осока волосистая (*Carex pilosa* Scop.), зеленчук желтый (*Galeobdolon luteum* Huds.) и копытень европейский (*Asarum europaeum* L.).

Летом 2023 года были заложены разрезы (по одному на площадку) и полуямы (по две на площадку) глубиной 100 и 60 см, соответственно. Основной разрез располагался в центре площадки в межкроновом пространстве, полуямы характеризовали варьирование в подкروновых пространствах. На пологом водораздельном склоне были вскрыты дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы разной степени оподзоленности и оглеенности, сформированные на покровных суглинках, подстилаемых мореной. Классификационное положение почв и горизонтов было дано про Классификации и диагностике почв России (Шишов, 2004), представлено в таблице 1.

Таблица 1. Почвы, представленные на пробных площадках.

Номер пробной площадки	Классификационное положение (Классификация..., 2004)
ПП 1	Дерново-подзолистая мелкая неглубокоосветлённая среднесуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной
ПП 2	Дерново-подзолистая мелкая глубокоосветлённая глубокооглеенная среднесуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной
ПП 3	Дерново-подзолистая мелкая глубокоосветлённая легкосуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной
ПП 4	Дерново-подзолистая мелкая глубокоосветлённая языковатая среднесуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной
ПП 5	Дерново-подзолистая мелкая сверхглубокоосветлённая языковатая среднесуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной

Методы

Отбор образцов на плотность проводился методом режущих колец Качинского объемом 100 см^3 в двойной повторности на одной глубине с шагом 10 см вниз по профилю (рис.1.). Полевая влажность почв определялась в день отбора: сушкой в муфельном шкафу при температуре 105°C с доведением до постоянной массы. Статистическая обработка результатов проводилась в программной среде R (R Core Team, 2024).

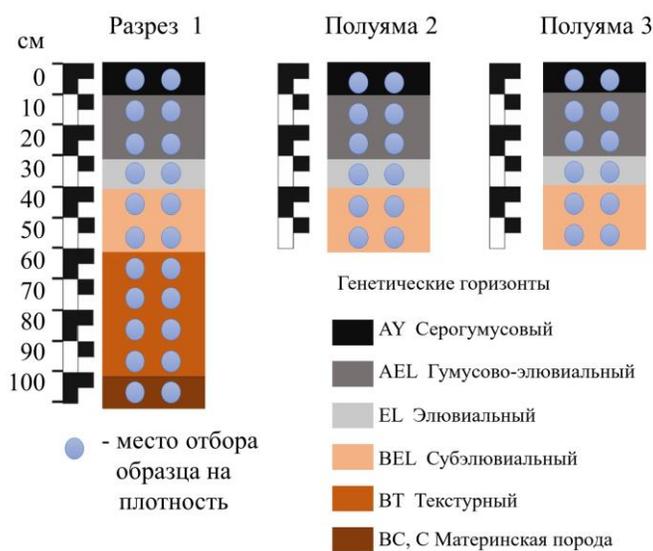


Рис. 1. Схема отбора образцов на плотность для одной пробной площадки

Результаты и обсуждение

Средние значения по глубинам (для разреза и двум полуямам) для каждого из пяти участков представлены в таблице 2. Для всех участков характерно увеличение плотности вниз по профилю, иногда в средней и нижней частях профиля встречается незначительное возрастание плотности у вышележащего горизонта по сравнению с нижележащим. Максимальный размах значений плотности по глубине составляет 1.11 г/см^3 , а минимальный – 0.81 г/см^3 . Средние значения плотности для верхних 10 см толщи на всех площадках не превышают 1 г/см^3 , что вероятно связано с обилием корней в поверхностном слое.

Коэффициент вариации плотности по глубинам между средними значениями для пробных площадок не превышает 9%. Максимальное значение относится к глубине 20 – 30 см и составляет 8.2%. Такие высокие значения связаны со сменой генетических горизонтов, так как на одной глубине могут быть представлены либо гумусовый, либо элювиальный горизонт. Срединные элювиально-иллювиальные и текстурные горизонты имеют примерно сопоставимые значения плотности на всех

площадках. Наименьший коэффициент вариации наблюдается на глубине 40 – 60 см в середине профиля, где не оказывают влияния поверхностные корни и включения камней материнской породы. Наибольшее варьирование средних значений плотности по площадкам наблюдается в верхних и нижних частях профиля.

Рассматривая нижнюю часть профиля, с глубины примерно 70 – 80 см, можно заметить некоторые особенности в распределении плотности между участками. Так, высокие значения плотности от 1.8 г/см³ характерны для участков ПП3 и ПП4. Более низкие значения плотности, не превышающие 1.7 г/см³, обнаружены на участках ПП1, ПП2 и ПП5. Вероятно, такие различия в плотности почв унаследованы от материнской породы.

Таблица 2. Профильное распределение средней плотности почв на пробных площадках и коэффициент вариации (Cv) между этими средними значениями по глубинам

Глубина, см	ПП 1	ПП 2	ПП 3	ПП 4	ПП 5	Cv, %	Повторность, на ПП
0-10	0.87	0.8	0.76	0.87	0.84	5.8	6
10-20	1.05	1.01	1.04	1.16	1.06	5.3	6
20-30	1.37	1.15	1.3	1.44	1.36	8.2	6
30-40	1.55	1.43	1.51	1.6	1.61	4.8	6
40-50	1.64	1.57	1.67	1.7	1.65	2.9	6
50-60	1.69	1.64	1.73	1.7	1.61	2.9	6
60-70	1.64	1.68	1.76	1.61	1.68	3.4	2
70-80	1.69	1.67	1.85	1.72	1.74	4.0	2
80-90	1.64	1.67	1.83	1.79	1.71	4.6	2
90-100	1.68	1.69	1.87	1.83	1.69	5.2	2

В таблице 3 приведены характеристики пространственного варьирования плотности почв для всех разрезов и полуям без усреднения по пробным площадкам. Также, там указаны наиболее часто встречающиеся на данных глубинах генетические горизонты. Средние значения плотности по глубинам могут быть проинтерпретированы как усреднённый профиль для биогеоценоза. Для гумусовых горизонтов, глубиной до 15 см, плотность не превышает 1.3 г/см³, минимальная зафиксированная плотность составляет 0.68 г/см³. Элювиальные горизонты характеризуются плотностью около 1.50 г/см³ и залегают на глубине 30-40 см. Плотность нижней части профиля изменяется в среднем от 1.65 до 1.85 г/см³, но есть также высокие значения, достигающие до 1.88 г/см³, что вероятно связано с особенностью моренных отложений.

Стандартное отклонение для всех измерений плотности на глубине от 0 до 40 см составляет около 0.10 – 0.15 г/см³, ниже по профилю эта величина уменьшается и равна в среднем 0.07 г/см³. Увеличение стандартного отклонения до 0.09 г/см³ на

глубине от 80 до 100 см может быть связано с наличием включений в нижней части профиля.

Для коэффициента вариации, как и для стандартного отклонения, наблюдается уменьшение варьирования с глубиной. Для верхней части профиля характерны значения коэффициента вариации от 10 до 14%, с глубины 40 см коэффициент не превышает 5%. Так же, как и для стандартного отклонения, в нижних 20-ти см профиля в горизонтах почвообразующих пород наблюдается незначительное увеличение варьирования плотности сложения, что генетически наследуется от физических свойств отложений, на которых сформированы почвы.

Таблица 3. Характеристики пространственного варьирования значений плотности почв в пределах одного биогеоценоза, г/см³

Глубина, см	Горизонт, КиДПР (2004)	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Повторность
0-10	AУ	0.827	0.68	1.08	0.113	13.6%	30
10-20	AEL	1.063	0.82	1.29	0.125	11.8%	30
20-30	AEL	1.324	0.84	1.61	0.160	12.1%	30
30-40	EL	1.540	1.32	1.68	0.112	7.3%	30
40-50	BEL	1.645	1.48	1.80	0.069	4.2%	30
50-60	BEL	1.674	1.52	1.79	0.073	4.4%	30
60-70	BT	1.674	1.59	1.78	0.062	3.7%	10
70-80	BT	1.733	1.63	1.85	0.073	4.2%	10
80-90	BT	1.729	1.61	1.84	0.085	4.9%	10
90-100	BC	1.749	1.65	1.88	0.088	5.0%	10

Для изучения влияния крон и межкрупных пространств елово-берёзового леса был проведён двухфакторный дисперсионный анализ для глубин от 10 до 30 см (рис.2).

В работе Сибуль (1981) отмечается повышение плотности почв в межкрупном пространстве лесных биогеоценозов, что объясняется обилием корней в почвенном профиле. В данном случае при сравнении средней плотности почв верхних гумусовых горизонтов в разрезах, расположенных в «окнах», и в полуяхмах, расположенных под кронами, заметна незначительная разница. Однако, повышение плотности почв в межкрупных пространствах не является статистически значимым, как видно из таблицы дисперсионного анализа (таблица 4).

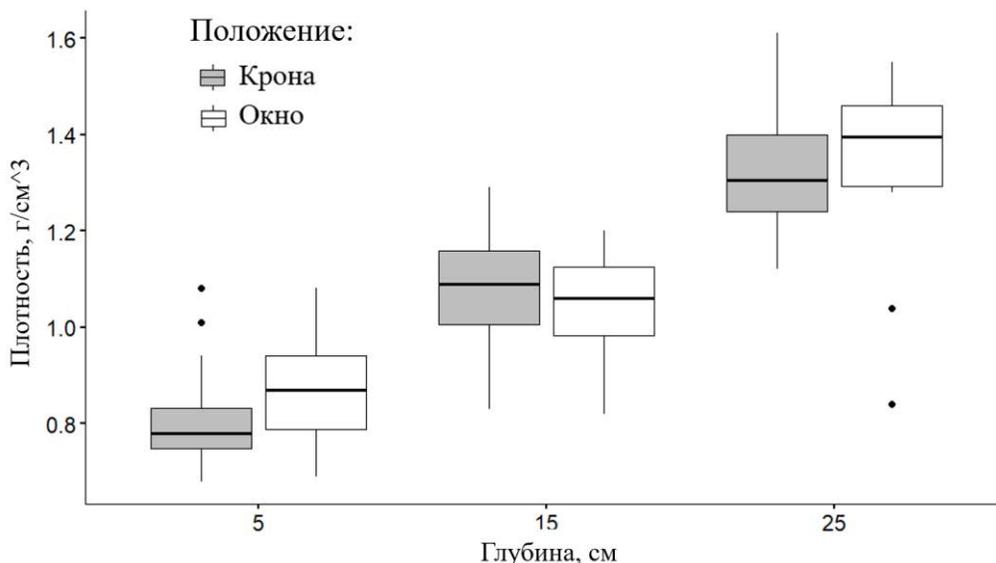


Рис. 2. Диаграммы размаха для значений плотности по грациям факторов «Положение» и «Глубина».

Таблица 4. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа и средние по грациям факторов

Фактор	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Средний квадрат	F-критерий	Вероятность превышения
Положение	0.0044	1	0.0044	0.2	0.62
Глубина	3.7081	2	1.8541	102.7	0.00
Случайность	1.5528	86	0.0181		

Фактор	Градации	Средняя плотность, г/см ³	Фактор	Градации	Средняя плотность, г/см ³
«Положение»	Крона	1.067	«Глубина»	0-10 см	0.827
	Окно	1.081		10-20 см	1.063
				20-30 см	1.324

Полученные значения плотности и её варьирования по усреднённому профилю согласуются с данными, полученными другими исследователями: отмечается снижение дисперсии и коэффициента вариации с глубиной (Сибуль, 1981). Влияние пространственного фактора оценивается в 18% для глубины 2-6 см и 9% для глубины 10 – 14 см, что сопоставимо с полученными нами результатом 14% для глубины 0 – 10 см и 12% для глубины 10 – 20 см.

В работах по оценке запасов органического углерода, где данные по плотности автоморфных почв России были получены из почвенно-географической базы данных (Шоба и др., 2010), значения стандартного отклонения и плотности для минеральных горизонтов сопоставимы с полученными нами (Чернова, 2020). Размах плотности по всему профилю совпадает, и составляет от 0.77 до 1.89 г/см³, со стандартным отклонением 0.197, что выше полученного в данной работе.

Заключение

Общей закономерностью для всех пробных площадок внутри биогеоценоза вторичного берёзово-елового леса на дерново-подзолистых почвах является увеличение плотности сложения вниз по профилю. Верхние гумусовые горизонты характеризуются значениями плотности от 0.68 до 1.29 г/см³, элювиальные горизонты от 1.32 до 1.68 г/см³. Срединные переходные и текстурные горизонты принимают значения около 1.67 г/см³, материал материнской породы может изменяться по плотности от 1.65 до 1.88 г/см³.

Характеристики варьирования плотности снижаются с глубиной. Коэффициент вариации уменьшается с 14 до 4 %, стандартное отклонение с 0.16 до 0.07 г/см³.

Верхние горизонты почв, глубиной до 30 см отличаются высоким варьированием (коэффициент вариации до 10-14%), что связано вероятно с обилием корневых систем и наличием турбаций. Нижняя часть профиля может слегка повышать варьирование в пределах 1.5% (от 3.5 до 5.0%), что предположительно связано с наличием включений камней в почвообразующей породе.

Расположение разрезов и полуям под кронами и в межкрупных пространствах не оказывает статистически значимого влияния на плотность почв в пределах верхних 30 см.

Кроме вертикальной и горизонтальной неоднородности, значимыми могут оказаться такие характеристики почв как наличие корней и каменистость профиля.

Благодарность

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Литература

Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. (2004) Классификация и диагностика почв России., Смоленск, 341 с.

- Сибуль Р.А. (1981) Особенности пространственного варьирования некоторых физических свойств дерново-подзолистой почвы в лесном биогеоценозе. Автореф. дис. ... биол. наук. М., 28 с
- Чернова О. В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. (2020) Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе. *Почвоведение*. **3**, 340-350. – DOI 10.31857/S0032180X20030028.
- Честных О.В., Замолотчиков Д.Г. (2004) Зависимость плотности почвенных горизонтов от глубины их залегания и содержания гумуса. *Почвоведение*. **8**, 937–844.
- Шейн Е.В. (2005) Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 432 с.
- Шоба С.А., Столбовой В.С., Алябина И.О., Молчанов Э.Н. (2008) Почвенно-географическая база данных России. *Почвоведение*. **9**, 1029-1036. URL: <https://soil-db.ru/> (дата обращения: 25.04.2024).
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.R-project.org/> (дата обращения: 25.04.2024).

УДК 631.42

МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ZN И CU С ТВЕРДОФАЗНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ПОЧВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ, РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

Минкина Т.М., Замулина И.В., Манджиева С.С., Невидомская Д.Г., Бауэр Т.В.,
Бурачевская М.В., Цицуашвили В.С.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
tminkina@mail.ru

MECHANISMS OF INTERACTION OF ZN AND CU WITH SOLID-PHASE SOIL COMPONENTS USING METHODS OF PHYSICAL AND CHEMICAL FRACTIONATION, X-RAY STRUCTURAL ANALYSIS

Minkina T.M., Zamulina I.V., Mandzhieva S.S., Nevidomskaya D.G., Bauer T.V.,
Burachevskaya M.V., Tsitsuashvili V.S.

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Annotation: For the first time, to identify the carrier phases of heavy metals in Technosols, original studies of XRD method was carried out on a sample after each stage of sequential extraction using the international standardized three-stage BCR sequential fractionation scheme.

Введение

Изучение отдельных гранулометрических фракций, выделенных из загрязненных и незагрязненных почв, представляет интерес для более детального анализа роли органо-минеральных почвенных компонентов в удерживании металлов. Высокодисперсные фракции характеризуется наиболее высокими концентрациями металлов, что обусловлено высокой адсорбционной способностью входящих в их состав вторичных глинистых минералов, коагелей полуторных окислов и кремнекислоты, окристаллизованных окислов железа и алюминия и гумусовых веществ более низкой конденсированности (Минкина и др., 2004; Крыщенко и др., 2006). От степени дисперсности частиц зависит прочность закрепления ТМ в почве и их биодоступность. Применение инновационных методов рентгеноструктурного анализа позволяет изучить особенности видообразования и структурных трансформаций форм металлов в твердофазных частицах почв. Целью настоящего исследования было изучение механизмов взаимодействия Zn и Cu с твердофазными компонентами почв с применением комплекса методов физического и химического фракционирования, рентгеноструктурного анализа.

Объекты и методы

Объекты исследования

Объектом исследования выступили загрязненные почвы территории кластера химических предприятий Каменск-Шахтинский Ростовской области. Значительный объем промышленных стоков, обогащенных органическим и неорганическими поллютантами поступал в специализированные шламонакопители, в качестве которых в 1950-1990 гг. использовались естественные водоемы в пойме р. Северский Донец: оз. Сошник, Резак, Поличка, Сорное, Атаманское. Самым крупным резервуаром-отстойником служило оз. Атаманское на левом берегу р. Северский Донец. К настоящему времени озеро полностью высохло (подтопляется в отдельные годы во время наводнений) и представляет опасность при пылении поверхности для качества сельскохозяйственных земель и здоровья населения близлежащих населенных пунктов. Почвенный покров исследуемой территории представлен незагрязненной луговой почвой и хемоземом. Свойства исследуемых почв приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физические и химические свойства исследуемых почв в слое 0-20 см

Почва	Физ. глина, (<0.01 мм), %	Ил,(< 0.001 мм), %	Сорг, %	рН	CaCO ₃ , %	(Гидр)оксиды Fe-Mn, %	Ca ²⁺ , смоль(+)/кг	Mg ²⁺ , смоль(+)/кг
Луговая	55,8	32,0	4,3	7,5	1,7	2,6	31,8	4,6
Хемозем	52,1	33,0	4,4	7,7	1,1	3,7	35,2	5,3

Методы исследования

Для выделения из почв и донных отложений гранулометрических фракций был использован метод лабораторных центрифуг с предварительным ультразвуковым воздействием (около 1 мин, при частоте 22 кГц) (Шаймухаметов, Воронина, 1972). Из образцов незагрязненных и загрязненных почв и донных отложений выделены тонкие коллоиды (< 0,08 мкм), грубые коллоиды (0,08-0,2 мкм), предколлоидная фракция (0,2-1 мкм) и мелкая пыль (1-5 мкм). Образцы перетирали в ступке пестиком с резиновым наконечником, пропускали через сито 1 мм и помещали в центрифужную пробирку. Добавляли дистиллированную воду и подвергали ультразвуковому воздействию. Параметры центрифугирования рассчитывались исходя из конфигурации ротора центрифуги и размера пробирки. Количество циклов составляло от 4 до 8.

В выделенных тонкодисперсных гранулометрических фракциях почв проводили исследование фракционного состава соединений Cu и Zn методом последовательного фракционирования BCR (Ure et al., 1993). Схема BCR является

стандартизированной бюро при комиссии европейских сообществ. Позднее к трехступенчатой схеме фракционирования была добавлена еще одна ступень для экстракции металлов, связанных с силикатами (Pueyo et al., 2008). Содержание Cu и Zn в экстрактах определено методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС) на атомно-абсорбционный спектрометре «Квант-2Z», ООО «Кортек», Москва.

Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием рентгеновского дифрактометра Bruker D2 Phaser с применением позиционно-чувствительного детектора Lynxeye по схеме вертикальной геометрии Брэгга-Брентано. Расчет концентраций отдельных минеральных фаз выполнялся с использованием метода эталонного коэффициента интенсивности (Reference Intensity Ratio, RIR). Относительная интенсивность рентгеновских дифрактограмм автоматически выставлялась таким образом, чтобы интенсивность самого большого дифракционного пика равнялась 1000 условным единицам. При составлении сводных таблиц для каждого образца совпадающими считались дифракционные пики с $\Delta 2\theta < 0,1^\circ$. Расшифровка результатов рентгеновских дифрактограмм осуществлялась с использованием ресурсов базы данных COD2016 версии COD-inorg 2022.06.29 и базы ICSD (Inorganic Crystal Structure Database). Для фазового анализа использовался программный пакет Match! версии 3.14.2.238 (Crystal Impact GbR, Бонн Германия).

Результаты и обсуждение

Выделены тонкие гранулометрические фракции из исследуемых образцов. Доля фракции размером $< 0,08$ мкм увеличивается на 10% при загрязнении. Установлено, что содержание Cu и Zn в составе тонкодисперсных гранулометрических фракций почв как природных, так и техногенных ландшафтов выше, чем в почве в целом: Cu - в 4 раза, Zn – в 3 раза. Наибольшее количество сосредоточено во фракции $< 0,08$ мкм. Выявлено, что с увеличением доли тонких фракций в условиях загрязнения в них возрастает концентрация тяжелых металлов.

Исследование состава соединений Cu и Zn в различных гранулометрических фракциях показало, что количество обменных соединений в незагрязненных почвах во фракция менее 1 мкм минимально и не превышает 10% от суммы фракций. В условиях загрязнения содержание обменных соединений металлов увеличивается незначительно, в отличие от соединений, связанных с карбонатами, содержание которых возрастает с увеличением дисперсности частиц. Установлено, что с уменьшением размера частиц почв, растёт доля соединений, связанных с Fe- Mn (гидр)оксидами (рис. 1).

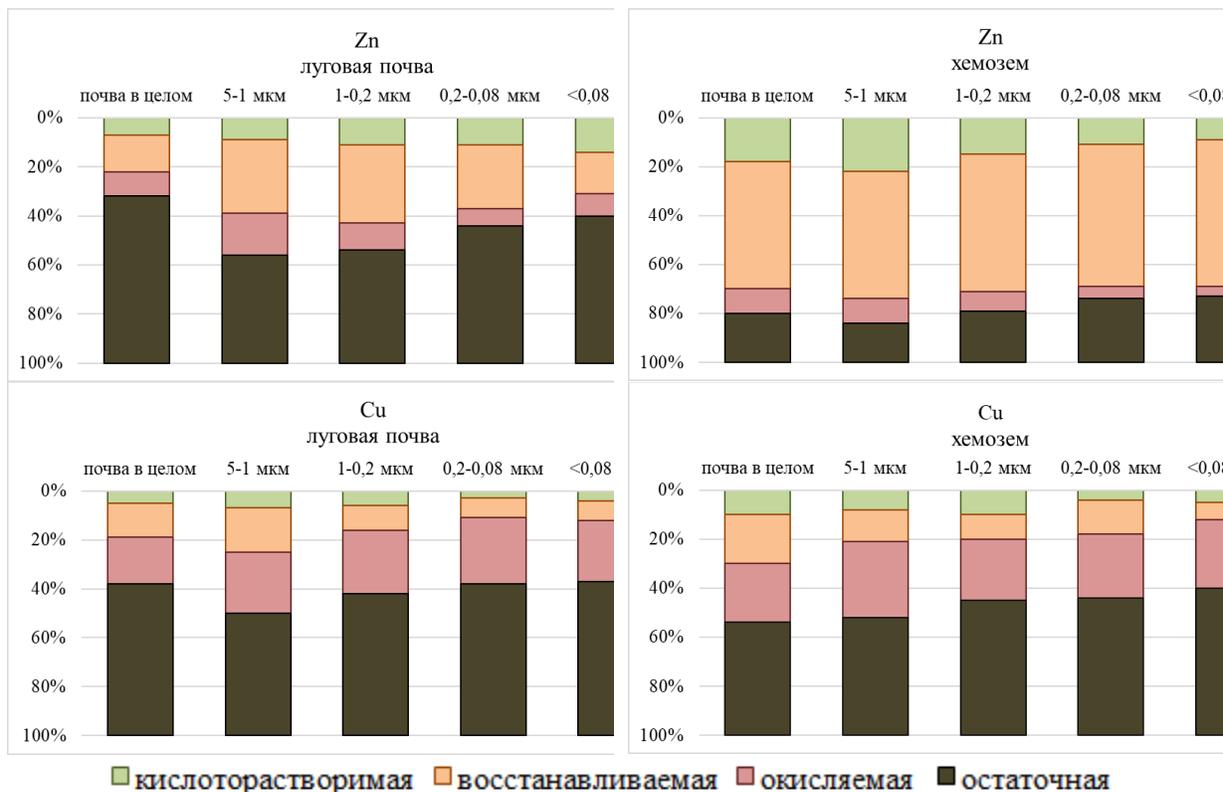


Рис. 1. Фракционное распределение Cu и Zn в луговой почве и хемоземе, % от суммы фракций

На основе химического фракционирования было установлено, что наиболее активными компонентами в удерживании ионов ТМ являются органическое вещество, несиликатные соединения Fe и Mn и карбонаты. Значительная доля соединений металлов находится в составе первичных и вторичных силикатов. Полученные данные по фракционному составу Cu и Zn позволили установить доли фазовых компонентов в составе исследуемых образцов. В среднем доля минеральных фаз для исследуемых металлов составила для: Cu $\approx 70\%$, Zn $\approx 90\%$. Накопление металлов в составе органических компонентов составило: Cu $\approx 25\%$, Zn $\approx 10\%$. Для луговой незагрязненной почвы с уменьшением размера гранулометрических фракций увеличивается сходство Cu с органической фазой и Zn – с минеральной.

На основе данных рентгеновской дифракции (XRD) проведен фазовый анализ изучаемых образцов и идентифицированы доминирующие кристаллические компоненты, входящие в их состав. Наряду с породными минеральными фазами большая часть пиков, присутствующих на дифрактограммах образцов хемоземов после первого и второго этапов фракционирования, соответствуют аутигенным металлосодержащим минералам:

Cu-содержащие: ковеллит (CuS), борнит (Cu₅FeS₄), халькозин (Cu₂S), CuSO₄, CuCO₃, CuCl₂;

Zn-содержащие: сфалерит (кубический ZnS), вюртцит (гексагональный ZnS), ZnSO₄.

Почва после первой стадии экстрагирования наиболее насыщена сульфидами, в то время как в образце после второго, а особенно после третьего этапа экстрагирования доминируют филлосиликаты, как монтмориллонит (рис. 2).

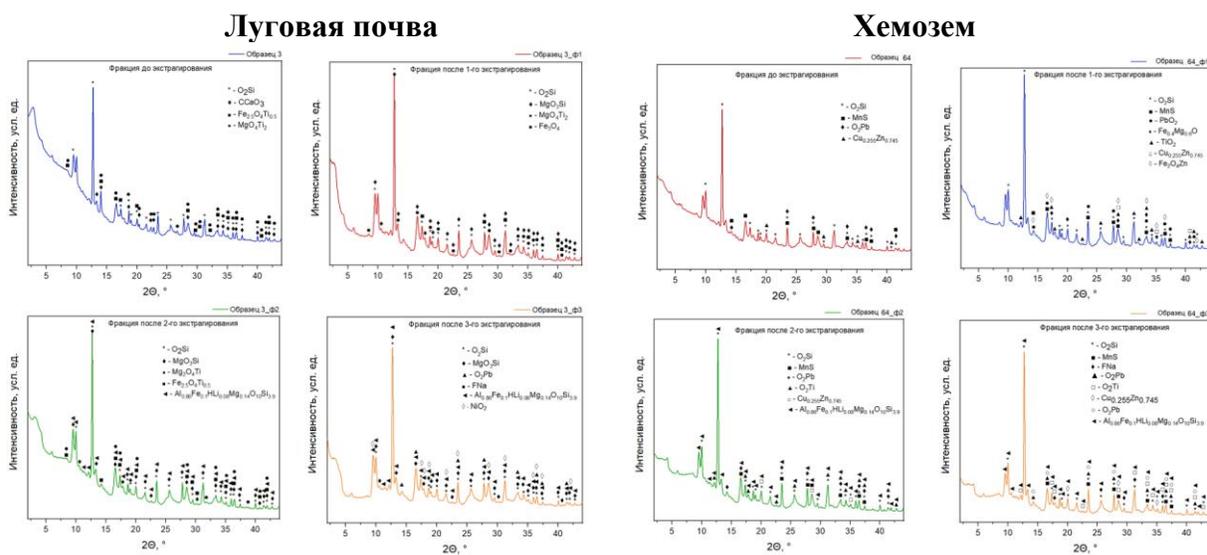


Рис. 2. Минеральные кристаллические фазы в образцах луговой почв и хемозема до и после процедуры выделения последовательных селективных вытяжек по методу BCR

Выводы

С использованием физических и химических методов фракционирования установлены механизмы поглощения тяжелых металлов основными фазами-носителями в зависимости от дисперсности образцов. Выявлено, что содержание обменных соединений Cu и Zn увеличивается незначительно. С уменьшением размера частиц почв растет доля соединений, связанных с Fe-Mn (гидр)оксидами. В незагрязненной луговой почве наблюдается следующее распределение Zn по фракциям: остаточная > восстанавливаемая (связанная с оксидами Fe-Mn) > окисляемая (связанная с органическим веществом) > кислоторастворимая (связанная с карбонатами и обменная). Соединения Cu распределяются иначе: остаточная фракция > окисляемая (связанная с органическим веществом) > восстанавливаемая (связанная с оксидами Fe-Mn) > кислоторастворимая (связанная с карбонатами и обменная). Для хемозема содержание Cu образует ряд: остаточная фракция > окисляемая (связанная с органическим веществом) > кислоторастворимая (связанная

с карбонатами и обменная) >восстанавливаемая (связанная с оксидами Fe-Mn); Zn: восстанавливаемая (связанная с оксидами Fe-Mn > остаточная фракция > кислоторастворимая (связанная с карбонатами и обменная) > окисляемая (связанная с органическим веществом).

Впервые для идентификации фаз-носителей тяжелых металлов в хемоземах проведены оригинальные рентгеноструктурные исследования образцов после каждой стадии последовательного экстрагирования с использованием международной стандартизированной трехступенчатой схемы BCR. Установлено присутствие аутигенных Cu- и Zn-содержащих минералов в хемоземе после первого и второго этапов фракционирования.

Благодарность

Исследование выполнено в лаборатории «Здоровье почв» Южного федерального университета при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение No 075-15-2022-1122.

Литература

Крыщенко В.С., Рыбьянец Т.В., Бирюкова О.А., Кравцова Н.Е. (2006)

Компенсационный принцип анализа гумус-гранулометрических соотношений в полидисперсной системе почв. *Почвоведение* **4**, 473-483.

Минкина Т.М., Статовой А.А., Крыщенко В.С. (2004) Механизмы поглощения свинца гранулометрическими фракциями чернозема обыкновенного. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки* **4**. 66-69.

Шаймухаметов М.Ш., Воронина К.А. (1972) Методика фракционирования органо-глинных комплексов с помощью лабораторных центрифуг. *Почвоведение* **8**, 134-138.

Pueyo M., Mateu J., Rigol A., Vidal M., López-Sánchez J. F., Rauret G. (2008). Use of the modified BCR three-step sequential extraction procedure for the study of trace element dynamics in contaminated soils. *Environmental pollution* **152(2)**, 330-341.

Ure A.M., Quevauviller P.H., Muntau H., Griepink B. (1993) Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities. *International journal of environmental analytical chemistry* **51 (1-4)**, 135-151.

УДК 581.12/14:630:161.32

БАЛАНС УГЛЕРОДА БЕРЕЗОВО-ИВОВОГО БИОГЕОЦЕНОЗА НА ОСУШЕННОМ БОЛОТЕ

Молчанов А.Г.¹, Ольчев А.В.²

¹ Институт лесоведения Российской академии наук, с. Успенское Московская обл.,
Российская Федерация
a.georgievich@gmail.com

² МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Российская Федерация
aoltche@yandex.ru

CARBON BALANCE OF A BIRCH-WILLOW BIOGECENOSIS IN A DRAINED PEAT BOG

Molchanov A.G.¹, Olchev A.V.²

¹ Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, Uspenskoye, Moscow region,
Russian Federation Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: In the birch-willow biogeocenosis on drained peatbog, the average CO₂ emission from the soil in autumn was 101.6 kg per ha day⁻¹. We found that in our biogeocenosis the CO₂ emission from the wet peat soil was twice as high as in the hayfield. We can assume that such high values of CO₂ emissions from the soil occur due to optimal values of peat soil moisture, which occurred due to drainage of the peat bogs. The photosynthetic productivity was evaluated by the dependence of photosynthesis on the solar radiation absorbed by the plant canopy. It was found that the canopy of young birch-willow absorbed 66.1 kg CO₂ per ha day⁻¹. As a result, the C balance in the birch-willow biogeocenosis turned out to be negative and equaled 35.5 kg per ha day⁻¹, despite the fact that the photosynthetic productivity was almost the same as in the birch forest of the Yaroslavl region.

Введение

В последние десятилетия выработанные торфяники, вне зависимости от категории пользователей служат источником CO₂ и теряют запасы углерода (Чистотин и др., 2006; Суворов и др., 2018; Ильясов и др., 2017), не принося экономической пользы. Даже в заброшенном состоянии продолжается деструкция торфа и интенсивная эмиссия CO₂ (Чистотин и др., 2006; Суворов и др., 2015). В настоящее время проводится довольно много исследований по оценке соотношения фотосинтетической продуктивности в древостоях и дыхания почвы. Так сосновый лес на супесчаном суглинке в Шотландии имел годовые потери С при дыхании 565, 629 и 640 г С м⁻² год⁻¹, что составляло 77, 77 и 65% годового валового поглощения С, соответственно. Основной вклад в дыхание лесных экосистем вносят потоки углерода из лесной подстилки, при этом доли годового дыхания лесной подстилки, листвы и древесины составляют 46-62, 27-44 и 9-10% соответственно. (Wang at al., 2004). В Бельгии в насаждении *Pinus sylvestris* L. NEP

была $11.5 \text{ т CO}_2 \text{ га}^{-1}$, составив 16% от GPP, при этом микробное дыхание (R_h) составило 32% от общего дыхания почвы (Sampson et al., 2001). В новозеландской плантации *Pinus radiata* фотосинтетическая продуктивность и NEP составляли от $62.5\text{--}68 \text{ т CO}_2 \text{ га}^{-1}$ до $18.5\text{--}26.6 \text{ т CO}_2 \text{ га}^{-1}$, что соответствует 30 и 39% соответственно (Arneeth et al., 1998). В Канаде в древостое *Populus tremulooides* GPP была $44.1\text{--}52.2 \text{ т CO}_2 \text{ га}^{-1}$ и NEP $2.2\text{--}8.9 \text{ т CO}_2 \text{ га}^{-1}$ (Barr et al., 2002). Исследований о соотношения GPP/NEP в древостоях, произрастающих на осушенных и обводненных болотах, пока достаточно мало.

В настоящей работе рассчитан баланс CO_2 на основе эмиссии CO_2 с поверхности почвы и фотосинтетической продуктивности березово-ивового биогеоценоза, произрастающего на месте осушенного болота.

Методика и объекты исследования

Исследование проводилось в Московской области в Талдомском районе на осушенном верховом болоте. Современная глубина осушительных каналов составляет 0.8–1.5 м. Края каналов заросли древесно-кустарниковой растительностью высотой 2–12 м (березово-ивовый молодняк). На этом осушенном верховом болоте были проведены определения интенсивности эмиссии CO_2 с поверхности почвы и фотосинтетической продуктивности березово-ивового молодняка. Определяли интенсивность фотосинтеза ивы трехтычинковой (*Salix triandra*) и березы повислой (*Betula pendula* Roth). Экспериментальные участки находились на расстоянии около 10 м от осушительной канавы. Исследования проводили весной (29-31.05.2017) и осенью (20-23.09.2017). Фитомасса древесного полога в этом 10 летнем биогеоценозе составила 80% березы и 20% ивы. Определение фитомассы проводили методом учетных площадок размером 1 м^2 в количестве 6 шт. через 5 м случайным методом.

$\text{LAI} = 166451/4 = 4.16 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$. LAI листвы = $159171/4 = 3.98 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$. Биомасса = 6747 г м^{-2} или 64.7 т/га абс. сух. массы = 16.2 т га абс. сух. массы. Годичный прирост = Листва $1070 +$ ауксибластов $231 +$ трава $91 + 1/3$ ветвей и стволиков $1778 = 3170 \text{ г м}^{-2}$ или $31.7 \text{ т га}^{-1} / 4 = 7.9 \text{ т абс. сух. массы га}^{-1} \text{ год}$ $\text{LAI} = 166451/4 = 4.16 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$ LAI листвы = $159171/4 = 3.98 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$.

Определяли эмиссию CO_2 с поверхности почвы. Для этого на поверхность почвы устанавливали прозрачную камеру диаметром 20 см и высотой 10 см, через которую над поверхностью почвы в камере поддерживали постоянный проток атмосферного воздуха со скоростью 60-100 л ч⁻¹. Измерение газообмена CO_2 с поверхности листвы ивы и березы проводили одновременно в обеих породах по открытой схеме по методу Edwards и Sollins (1973) с помощью инфракрасного газоанализатора LI-820 и LI-840 (LI-COR, США). Показания газоанализатора регистрировались логгерами (EMS32, Чехия) каждые 20 секунд вместе с данными

о температуре почвы и воздуха, приходящей суммарной солнечной радиации. Солнечную радиацию (Вт м^{-2}) определяли термоэлектрическим пиранометром Янишевского (СССР), температуру воздуха и почвы ($^{\circ}\text{C}$) - датчиками, встроенными в EMS32. Регистрация значений газообмена CO_2 и экологических параметров проводилось непрерывно с помощью оригинального, изготовленного для записи данных по газообмену растений, автоматического устройства. Устройство построено на основе трехходового переключателя, позволяющего осуществлять прокачку воздуха через камеры в течение всего периода измерений, препятствуя застаиванию воздуха в камерах в периоды, когда измерения газообмена не проводились. Время опроса всех экспозиционных камер составляло каждые 25 мин непрерывно в течение суток. Определение влажности почвы (%) проводили термовесовым методом. Более подробная методика определения газообмена изложена нами ранее (Молчанов, 2014).

Для определения пропускания солнечной радиации пологом березово-ивового молодняка использовали цифровой фотоаппарат (Nikon) с широкоугольным объективом 180° (Sigma). Фотографии делали на высоте 5 см от поверхности почвы через 5 м.

Расчет фотосинтетической продуктивности на гектар для березово-ивового молодняка проводили на основе полученных ранее данных для березового насаждения 40 летнего возраста Ia бонитета в Угличском районе Ярославской обл. в чернично-кисличном березняке, произрастающем на дерново-подзолистых супесчаных почвах при запасе доступной влаги 50 мм в 50 сантиметровом слое почвы (Молчанов, 2015). Для оценки фотосинтетической продуктивности в 40-летнем березняке была разработана методика по поглощенной солнечной радиации пологом древостоя и коэффициенту использования поглощенной ФАР на фотосинтез за дневной период (Молчанов 1983, 2005, 2007; Molchanov, 2000, 2002).

В березово-ивовом молодняке было определено пропускание солнечной радиации пологом древостоя. Приняли, что альbedo для молодняка такое же, как в 40-летнем березняке. Поглощенную радиацию березово-ивовым молодняком (%) определили по радиации пропускания и альbedo кроны.

$$Q\text{-young}_{abs} = 100 - Q_{tran} - A_{crown} + A_{soil}$$

Где $Q\text{-young}_{abs}$ – процент поглощенной радиации пологом березово-ивового молодняка, Q_{tran} – коэффициент пропускания радиации пологом в %, A_{crown} – альbedo кроны березово-ивового молодняка, A_{soil} – альbedo почвы под пологом березово-ивового молодняка.

Используя полученные ранее данные (Молчанов, 1983), определили соотношение поглощенной CO_2 пологом 40-летнего березняка за световой день ($P\text{-betul}$) к единице поглощенной солнечной радиации за день. ($Q\text{-betul}_{abs}$), (т.е. затраты

поглощенной радиации на 1 грамм поглощенной CO_2 пологом древостоя) $P\text{-betul} / Q\text{-betul}_{abs}$.

Фотосинтетическую продуктивность березово-ивового молодняка ($P\text{-young}$) определяли по полученному отношению поглощенной CO_2 к поглощенной солнечной радиации пологом ($P\text{-betul} / Q\text{-betul}_{abs}$) и поглощенной солнечной радиации березово-ивовым молодняком ($Q\text{-young}_{abs}$).

$$P\text{-young} = Q\text{-young}_{abs} \times (P\text{-betul} / Q\text{-betul}_{abs})$$

Баланс CO_2 березово-ивового биогеоценоза определили по соотношению эмиссии CO_2 с почвы и фотосинтетической продуктивности.

Результаты и обсуждение

Световые кривые фотосинтеза ивы и березы, полученные в утренние и послеполуденные часы, характеризуются минимальными различиями (рис. 1). При сравнении световых кривых фотосинтеза березы произрастающих на осушенном болоте и в Ярославской области в древостое Ia бонитета, полученных в дополуденные часы, различий также практически не наблюдается. Интенсивность фотосинтеза при световом насыщении была в обоих местах произрастания одинаковой.

Полученные значения интенсивности фотосинтеза березы, произрастающей на осушенном болоте, сравнимы с данными, полученными для *Betula pendulum* в Северной Америке – 12 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [Ranney et al., 1991], в Московской обл. (Цельникер, 1978) и Карелии (Дроздов и др., 1995; Курец, Дроздов, 2008) – 19.6 мг $\text{CO}_2 \text{ дм}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, или 12.3 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Для *Betula papyrifera* в Канаде получено, что у освещенных сеянцев максимальный фотосинтез был 18-16 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а у затененных 6-8 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Landhäusser, Lieffers, 2001). В Шотландии 11.4 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Levy et al., 1999). В Швеция, у *Salix viminalis* L. интенсивность фотосинтеза была 0.600-0.700 мг $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при радиации 400-600 В м^{-2} (Lindroth, Cienciala, 1996).

Рассмотрим зависимость интенсивности фотосинтеза ивы от солнечной радиации, произрастающей на сыром и влажном участках. Оба участка различалась даже не влажностью почвы (400 и 450%), а уровнем залегания грунтовых вод (20 и 30 см). В данных условиях произрастания на протяжении светового дня у ивы не наблюдается различий в световых кривых фотосинтеза (рис. 2). При сравнении световых кривых фотосинтеза, полученных нами у ивы трехтычиночной (*Salix triandra*) с данными, полученными в Финляндии (Кайбеяйнен, 2007, 2009) у ивы чернеющей (*Salix myrsinifolia*) и ивы шерстистопобеговой (*Salix dasyclados*) было получено, что у ивы чернеющей максимальные значения интенсивности фотосинтеза были около 15 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а у ивы шерстистопобеговой в начале июня значения фотосинтеза составили - 19 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, и в конце августа - 14

мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. В нашем исследовании у ивы трехтычиночной в конце мая и в сентябре интенсивность фотосинтеза при световом насыщении была существенно ниже - 13 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$.

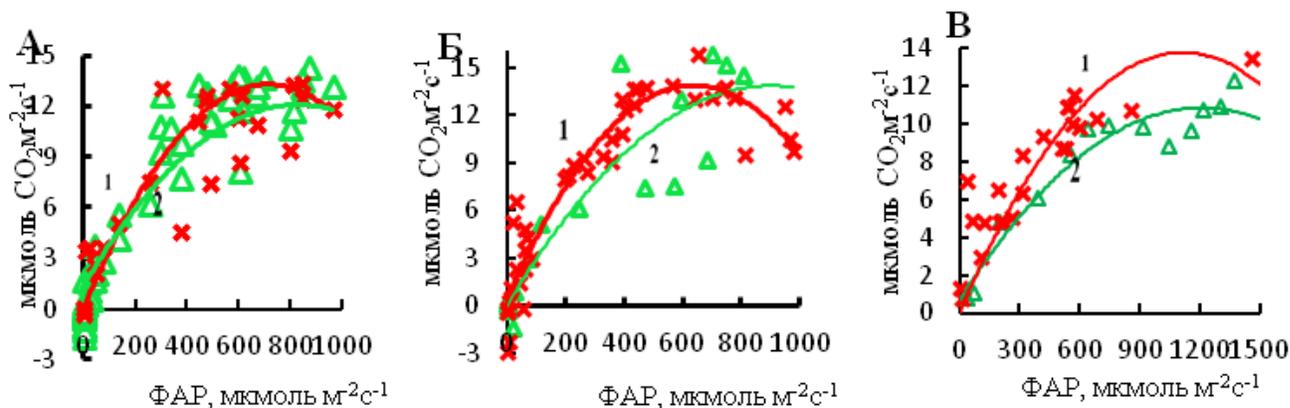


Рис. 1. Световые кривые фотосинтеза ивы, полученные в сентябре на сыром (1) и влажном (2) участках осушенном болота (А). Утренние (1) и послеполуденные (2) часы (Б).

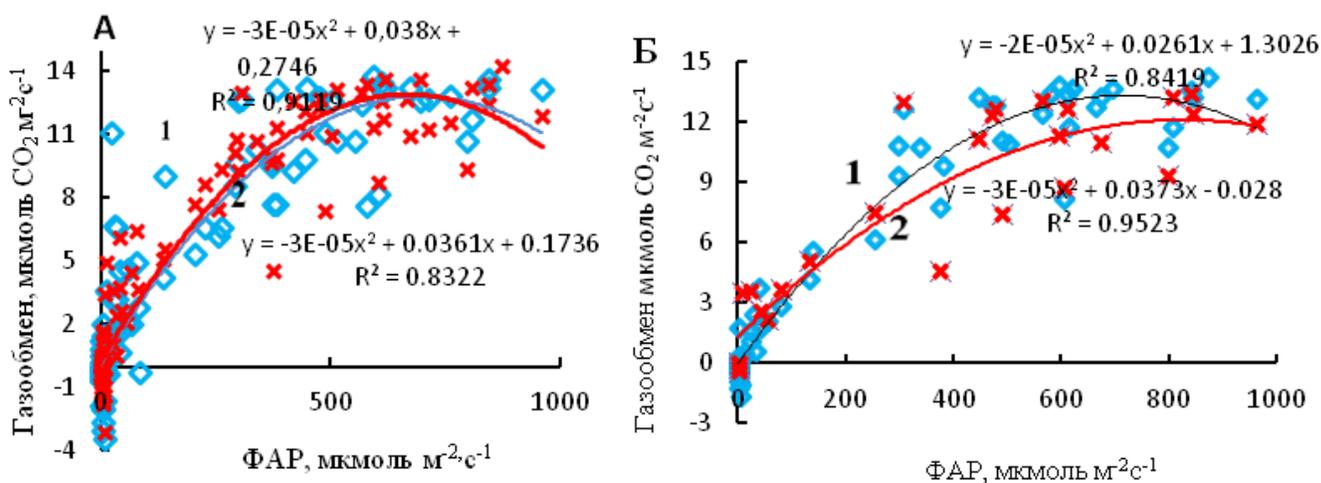


Рис. 2. Световые кривые фотосинтеза ивы, полученные в сентябре месяце на сыром (1) и влажном (2) участках осушенном болота (А). Утренние (1) и послеполуденные (2) часы (Б).

Результаты исследований показали, что в осенний период для ивы и березы сумма фотосинтеза за световой день одинакова. За 21.09 средняя интенсивность за день была для ивы 9.8 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ для березы – 9.2 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. На

единицу поглощенной CO_2 приходится одинаковая величина солнечной радиации – для ивы 29.4 ФАР мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$, для березы 31.2 ФАР мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$. В конце весеннего периода для ивы и березы сумма интенсивности фотосинтеза за световой день одинакова. Так за световой день 30.05 при средней интенсивности ФАР 435 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ интенсивность фотосинтеза была для березы 6.0 мкмоль $\text{CO}_2\text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, а для ивы – 5.84 мкмоль $\text{CO}_2\text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. На единицу поглощенной CO_2 приходится одинаковая величина ФАР – для ивы и березы - 75 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$.

В березняке Ia бонитета осенью при переменной облачности среднее значение ФАР за день было 403 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ и интенсивность фотосинтеза 5.24 мкмоль $\text{CO}_2\text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. На единицу поглощенной CO_2 приходится 77 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ФАР. Полученные данные показывают, что как в березово-ивовом молодняке, так и в березняке Ia бонитета при сходных условиях на образование единицы CO_2 поступает одинаковая величина ФАР.

Величина поглощения ФАР пологом березово-ивовом молодняке и березняка Ia бонитета также довольно близка: осенью в березово-ивовом молодняке пропускание было 28.7% $\text{SD}=13.4\%$, а летом в березняке Ia бонитета под среднем слое 19.1% $\text{SD}=3.7$ (рис. 3). Поэтому мы посчитали, что единица поглощения ФАР к поглощению CO_2 пологом березняка Ia бонитета и в березово-ивовом молодняке также будет одинакова.

Для оценки фотосинтетической продуктивности березняка Ia класса бонитета 40 летнего возраста воспользовались методикой зависимости использования коэффициента поглощенной радиации на фотосинтез от поглощенной древостоем солнечной радиации (Молчанов, 1983). Было получено, что в осенний период для ивы и березы сумма фотосинтеза за световой день одинакова. За 21.09 средняя интенсивность фотосинтеза за день была для ивы 9.8 для березы – 9.2 мкмоль $\text{CO}_2\text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. На единицу поглощенной CO_2 приходится одинаковая величина ФАР – для ивы 29.4 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$, для березы 31.2 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$. В конце весеннего периода для ивы и березы сумма интенсивности фотосинтеза за световой день была одинакова. Так за световой день 30.05 при средней интенсивности ФАР 435 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ интенсивность фотосинтеза была для березы 6.0 мкмоль $\text{CO}_2\text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, а для ивы – 5.84 мкмоль $\text{CO}_2\text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. На единицу поглощенной CO_2 приходится одинаковая величина ФАР – для ивы и березы - 75 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$.

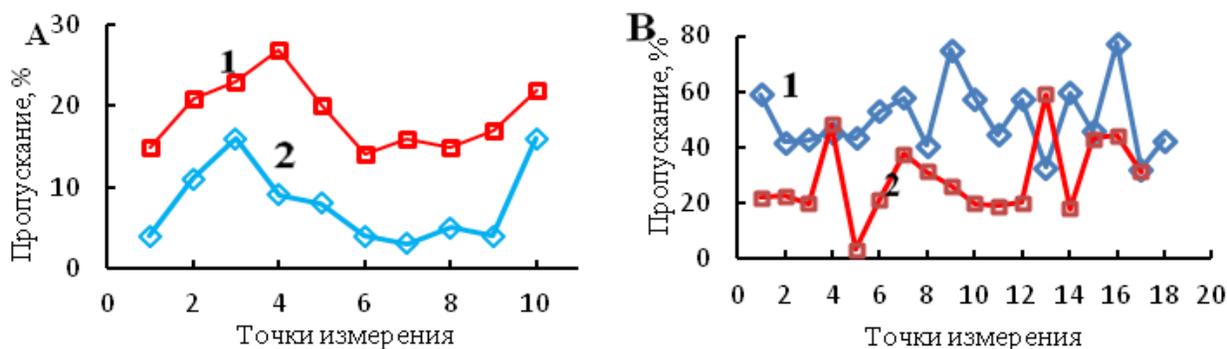


Рис. 3. Пропускание, % в мае (1) и сентябре (2) пологом березово-ивового молодняка на осушенном болоте. (А). Пропускание солнечной радиации, % в березняке Ia бонитета под средним (1) и нижними (2) слоями полога березового древостоя (В).

В березняке Ia бонитета осенью при переменной облачности среднее значение ФАР за день было $403 \text{ мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ и интенсивность фотосинтеза $5.24 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. На единицу поглощенной CO_2 приходится $77 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ФАР.

Полученные данные показывают, что как в березово-ивовом молодняке, так и в березняке Ia бонитета при сходных условиях на поглощение единицы CO_2 затрачивается одинаковая величина ФАР. Исходя из этого, мы пришли к выводу, что условия произрастания для ивы и березы являются оптимальными.

Поглощение ФАР пологом березово-ивовом молодняка и березняка Ia бонитета также довольно близко, осенью в березово-ивовом молодняке пропускание было сентябре 28.7% $\text{стандоткл}=13.4\%$, а летом в березняке Ia бонитета под среднем слое 19.1% $\text{стандоткл}=3.7$. Поэтому мы посчитали, что единица поглощения ФАР к поглощению CO_2 пологом березняка Ia бонитета и в березово-ивового молодняка также будет одинакова.

Для оценки фотосинтетической продуктивности березняка Ia класса бонитета 40 летнего возраста воспользовались методикой зависимости использования коэффициента поглощенной радиации на фотосинтез от поглощенной древостоем солнечной радиации (Молчанов, 1983). Получено, что в березняке Ia бонитета полог березового древостоя (верхний и средний) поглотил $288 \text{ кал см}^{-2}\text{день}^{-1}$ или $529.1 \text{ мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ (ФАР). В это время эти два слоя полога поглотили $491 \text{ кг CO}_2 \text{ га}^{-1}\text{день}^{-1}$ или $0.00124 \text{ гCO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Следовательно, отношение ФАР/фотосинтез равно $529.1 \text{ мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1} / 0.00124 \text{ гCO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ и для поглощения 1 г CO_2 требуется ФАР $426693 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$. В березовом древостое Ia бонитета в сентябре в среднем поглощение CO_2 за день было $285 \text{ кгCO}_2/\text{га}$ в день (Молчанов 1983).

Весной к пологу березово-ивового молодняка поступило $537.8 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$ или $27105120 \text{ мкмоль/м}^2\text{день}$. Полог молодняка поглотил ФАР 8267062 мкмоль/

м²день или $8267062/465742=17.75$ гСО₂/м²д или 248.5 кгСО₂/га день. В березовом древостое Ia бонитета в мае в среднем поглощение СО₂ за день было 276 кгСО₂/га день (Молчанов 1983).

В березово-ивовом молодняке 22.09.2017 в среднем поступило 503 мкмоль/м²с ФАР или 19918800 мкмоль/м²день. Так как полог молодняка по нашим данным имеет пропускание сентябре 28.7%, приняли альbedo над лесом и под пологом леса как в березняке Ia бонитета 22 и 3 %, получили, что поглощение ФАР полога молодняка осенью составило 52.3%. Получили, что полог молодняка поглотил ФАР = $19918800 \cdot 0.523 = 10417532$ мкмоль/м²день или 223.7 кгСО₂/га день.

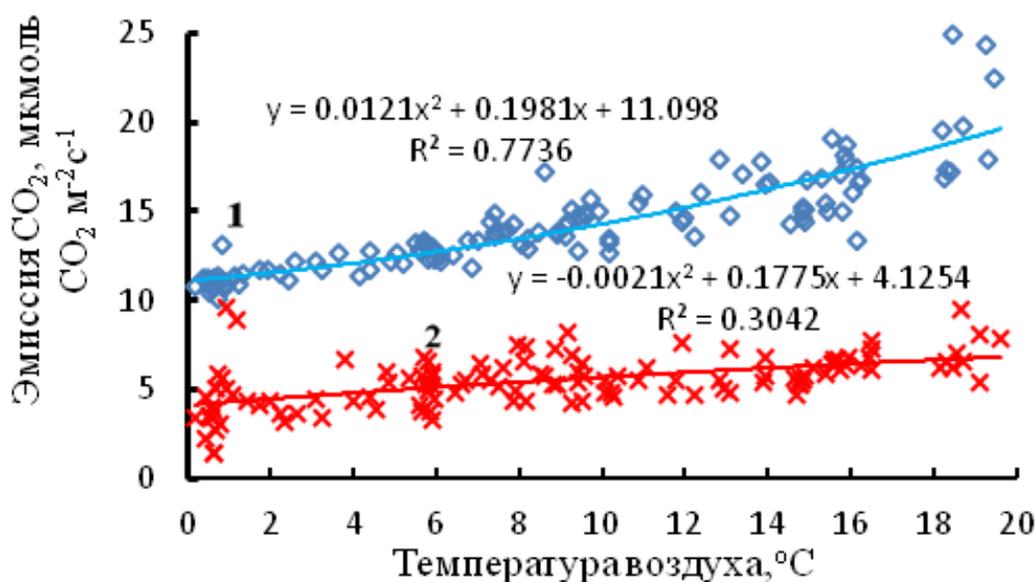


Рис. 4. Эмиссия СО₂ с поверхности почвы на осушенном болоте в сентябре на сыром (1) и влажном (2) участках в зависимости от температуры воздуха.

Определим баланс СО₂ в исследуемом березово-ивовом молодняке. Для этого оценим эмиссию СО₂ с поверхности почвы. На рис. 3 представлена зависимость эмиссии СО₂ с поверхности от температуры почвы на влажном и сыром участках. Средняя эмиссии СО₂ из почвы на влажном участке при влажности почвы 450% была 14.46 мкмоль СО₂ м⁻²с⁻¹, а на свежем при влажности почвы 400% – 5.46 мкмоль СО₂ м⁻²с⁻¹, средняя на обоих участках составила 9.8 мкмоль СО₂ м⁻²с⁻¹. В Ярославской области в пушицево-сфагновом сосняке при уровне поверхностных болотных вод около 7 см и с изменением температуры воздуха с 7 до 15°С дыхание почвы с поверхности очеса сфагнума было от 4 до 8 мкмоль СО₂ м⁻²с⁻¹ (Молчанов, 2017). В Воронежской области эмиссия с поверхности темно-серой лесной почвы с корнями при оптимальной влажности было 1 г СО₂ м⁻²ч⁻¹ (6.3 мкмоль СО₂ м⁻²с⁻¹)

(Molchanov, 2009). Коми республике с поверхности болотно-подзолистой почвы эмиссия CO_2 была в среднем $1.2 \text{ мкмоль } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Осипов, 2011). По данным Кургановой (2010) самые высокие потоки CO_2 из почвы в летний период характерны для черноземов, используемых в сельском хозяйстве, и для осушенных торфяных почв – $512\text{-}727 \text{ г С м}^{-2} = (403(512/180 \cdot 3.4/24 \cdot 1000) - 572 \text{ мг } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}) = (403/3600) = 0.112\text{-}0.159 \text{ мг } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Также по данным этих исследователей эмиссия CO_2 в южной тайге равна $259\text{-}380 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ или $881\text{-}1292 \text{ мг } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ($881/3600$) $0.245\text{-}0.359 \text{ мг } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В Московской области (Суворов, 2018) дыхание почвы на сенокосном участке на осушенном болоте, в непосредственной близости от нашего участка, между канавами в наиболее влажный год (2013) было $5060 \text{ мг С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ или $5060 \cdot 3.4/24 = 719 \text{ мг } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ или $0.2 \text{ мг } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$

На нашем осушенном участке средняя эмиссия CO_2 осенью составила $9.8 \text{ мкмоль } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ($9.8 \cdot 0.044 = 0.43 \text{ мг } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) или $38.02 \cdot 9.8 = 372.6 \text{ кг } \text{CO}_2/\text{га}$ день ($1 \text{ мкмоль } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} = 38.02 \text{ кг } \text{CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ день}^{-1}$) или $9.8 \cdot 0.044 = 0.431 \text{ мг } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Следовательно, на нашем участке влажная торфяная почва имела эмиссию CO_2 в два раза выше, чем средняя в сенокосном участке, а на темно-серой лесной почве составляла только 65% от эмиссии на нашем участке, в пушицево-сфагновом сосняке эмиссия CO_2 на «очесе» составила 85%. Такие высокие значения эмиссии CO_2 , мы можем предположить, происходят из-за оптимальных значений влажности торфяной почвы на исследуемых участках.

В результате баланс CO_2 в березово-ивовом молодняке оказался отрицательным, равным $-148.9 \text{ кг } \text{CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ день}^{-1}$, несмотря на то, что фотосинтетическая продуктивность была практически такой же как в березняке 1а бонитета.

Таким образом, на осушенном болоте, на котором вырос высокопродуктивный березово-ивовый биогеоценоз, баланс CO_2 оказался отрицательным, что можно объяснить очень высокой эмиссией CO_2 с влажной торфяной почвы.

Выводы

В ходе проведенных исследований было получено, что на выбранном участке влажная торфяная почва на осушенном болоте имела эмиссию CO_2 два раза выше, чем средняя на этом же осушенном болоте между канавами в сенокосном участке. На темно-серой лесной почве была только 65% от эмиссии на нашем участке, в пушицево-сфагновом сосняке эмиссия CO_2 на «очесе» составила 85%. Такие высокие полученные значения эмиссии CO_2 , мы можем предположить, происходят из-за оптимальных значений влажности торфяной почвы на исследуемых участках. В результате баланс CO_2 в березово-ивовом биогеоценозе оказался отрицательным = $-148.9 \text{ кг } \text{CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ день}^{-1}$ или $40.6 \text{ кг С га}^{-1} \text{ день}^{-1}$, несмотря на то, что фотосинтетическая продуктивность была практически такой же, как в березняке 1а бонитета. Таким образом, на осушенном болоте, на котором вырос

высокопродуктивный березово-ивовый биогеоценоз, баланс CO_2 оказался отрицательным, что можно объяснить очень высокой эмиссией CO_2 с поверхности влажной торфяной почвы.

Литература

Дроздов С.Н., Попов Э.Г., Курец В.К., Таланов А.В., Обшатко Л., Ветчинникова Л.В. (1995) Влияние света и температуры на нетто-фотосинтез и дыхание *Betula pendula var. pendula* и *B. pendula var. carelica* (Betulaceae). *Ботан. журн.* **80(3)**, 60-64.

Ильясов Д.В., Сиринов А.А., Суворов Г.Г., Мартыненко В.Б. (2017) Летние потоки диоксида углерода и метана на осушенном торфянике в условиях лесостепи республики Башкортостан. *Агробиология* **1**, 50–62.

Кайбейнен Э.Л. (2007) Оптимизация фотосинтеза и транспирации у неотделенных листьев ивы на плантациях быстрого возобновления. *Физиология растений* **54(3)**, 350-355.

Кайбейнен Э.Л. (2009) Параметры световой кривой фотосинтеза у *Salix dasyclado* и их изменение в ходе вегетации. *Физиология растений* **56(4)**, 490-499.

Кургановой И.Н. (2010) Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России // Автореф. дис. ... док. биол. наук. М., 48 с.

Курец В.К., Дроздов С.Н. (2008) Лабораторная оценка фотосинтетической активности семян древесных растений. *Лесоведение* **3**, 57-61.

Молчанов А.Г. (1983) Экофизиологическое изучение продуктивности древостоев. - М.: Наука, 135 с.

Молчанов А.Г. (2005) Фотосинтетическая продуктивность дубового древостоя в различных условиях водообеспеченности. *Физиология растений* **52(4)**, 522-531.

Молчанов А.Г. (2007) Баланс CO_2 в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. Тула: Гриф и К°. 284 с.

Молчанов А.Г. (2014) CO_2 древостоев в естественных условиях. Фотосинтетическая деятельность и продукционные процессы фитоценозов. Выпуск 1. Орел: изд-во Орел ГАУ, 63-88.

Молчанов А.Г. (2015) Изменчивость световых кривых фотосинтеза некоторых древесных пород. *Лесоведение* **1**, 20-26.

Молчанов А.Г. Газообмен диоксида углерода с поверхности сфагнома. // ДОСигИК. 2017. Т. 8. № 1. С. 43-54.

Суворов Г.Г. (2018) Изменение потоков CO_2 , CH_4 и запасов углерода лесоболотной экосистемой в результате добычи торфа и сельскохозяйственного использования (на примере Дубненского массива Московской области) // Дис. ... канд. биол. наук. М., 128 с.

Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А. (2015) Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области. *Агрохимия* **11**, 51–62.

Цельникер Ю.Л. (1978) Физиологические основы теневыносливости древесных растений. М.: Наука, 212 с.

Чистотин М.В., Сирин А.А., Дулов Л.Е. (2006) Сезонная динамика эмиссии углекислого газа и метана при осушении болота в Московской области для добычи торфа и сельскохозяйственного использования. *Агрохимия* **6**, 54–62.

Arneeth A., Kelliher F. M., McSeveny T. M. and Byers J. N. (1998) Net ecosystem productivity, net primary productivity and ecosystem carbon sequestration in a *Pinus radiata* plantation subject to soil water deficit. *Tree Physiology* **18**, 785-793.

Barr A.G., N.J. Grificts, T.A. Black, X. Lee, R.M. Staller., J.D. Fuentes., Z. Chen, K. Mjrgenstern. (2002) Comparing the carbon budgets of boreal and temperate deciduous forests stand. *Can. J. For. Res.* **32**, 813-822.

Edwards N.N., Sollins P. (1973) Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components. *Ecology* **54(2)**, 406-412.

Landhäusser S.M., Lieffers V.J. (2001) Photosynthesis and carbon allocation of six boreal tree species grown in under story and open conditions. *Tree Physiology* **21**, 243-250.

Levy P. E., Meir P., Allen S. J., Jarvis P. G. (1999) The effect of aqueous transport of CO₂ in xylem sap on gas exchange in woody plants. *Tree Physiology* **19**, 53-58.

Lindroth A., Cienciala E. (1996) Water use efficiency of short-rotation *Salix viminalis* at leaf, tree and stand scales. *Tree Physiology* **16**, 257-262.

Minayeva T., Sirin A., Bragg O. (eds.) (2009) A Quick Scan of Peatlands in Central and Eastern Europe //Wageningen, The Netherlands: Wetlands International, 132 p.

Molchanov A.G. (2000) Photosynthetic utilization efficiency of absorbed photosynthetically action radiation by Scots pine and birch forest stands in the southern Taiga. *Tree Physiology*. **20(17)**, 1137-1148.

Molchanov A.G. (2002) Estimation of photosynthetic productivity of a forest stand using the efficiency in the utilization of absorbed radiation by a stand for photosynthesis. Monitoring of Energy-Mass Exchange between Atmosphere and Forests Ecosystems. Gottingen. P. 31-42.

Molchanov A.G. (2009) CO₂ Emission from the Surface of Dark Gray Forest Soils of the Forest Steppe and Sandy Soddy-Podzolic Soils of the Southern Taiga. *Eurasian Soil Science* **42(13)**, 1470–1478.

Ranney T.G., Bir R E., Skroch W.A.(1991) Comparative drought resistance among six species of birch (*Betula*): influence of mild water stress on water relations and leaf gas exchange. *Tree Physiology* **8**, 351-360.

Sampson D.A., Janssens I.A., Cailemans R. (2001) Simulated soil CO₂ efflux and net ecosystem exchange in a 70-year-old Belgian Scots pine stand using the process model SECRETS. *Ann. For. Sci.* **58**, 31-46.

Wang K.-Y., Kellomäki S., Zha T. S., Peltola H. (2004) Component carbon fluxes and their contribution to ecosystem carbon exchange in a pine forest: an assessment based on eddy covariance measurements and an integrated model. *Tree Physiology* **24**, 19–34.

УДК 631.487: 26.361.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ СИНГЕНЕТИЧЕСКОГО ВЕЧНОМЕРЗЛОГО ОСАДКА С ПОГРЕБЕННЫМИ ПОЧВАМИ

Остроумов В. Е.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
Пушино, Россия
v.ostroumov@rambler.ru

MODELING OF SYNGENETIC ACCUMULATION
PERMAFROST SEDIMENT CONTAINING BURIED SOILS

Ostroumov V. E.

Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science
Pushchino, Russia

Annotation: Continental syngenetic permafrost sediments contain buried soils and are considered as carriers of information about sedimentation history. The distribution of magnetic susceptibility of the material of the Yedoma suite was measured at the Maly Chukociy Cape. A model of the permafrost sediment containing buried soils is proposed, based on the description of sedimentation at variable rates.

Введение

Сингенетические вечномерзлые осадки широко распространены в континентальных осадочных бассейнах холодных климатических областей. Они формировались в условиях непостоянной во времени скорости отложения континентального осадочного материала, который после пребывания в сезонноталом слое переходил в вечномерзлое состояние (Konishchev, 2013; Schirrmeister, 2022). В период пребывания осадка в сезонноталом слое его состав, строение и свойства изменялись под влиянием поверхностных факторов. Формировались почвы, которые по мере накопления новых осадков фиксировались в вечномерзлой толще. Благодаря этому разрезы сингенетических вечномерзлых толщ содержат информацию об истории накопления осадка. Для интерпретации этой информации разрабатывается модель формирования почвенно-осадочных последовательностей, которая описывает процессы накопления осадка и его трансформацию при почвообразовании в сезонноталом слое.

Материалы и методы

Рассматривается вечномерзлая толща едомной свиты позднего плейстоцена с погребенными почвами в обнажении на мысу Малый Чукочий (Колымская низменность). С поверхности здесь развиты сезоннопротаивающие типичные и

грубогумусированные криоземы (Cryosols) (Губин, 2020). Они подстилаются вечномерзлым осадком едомной свиты позднеплейстоценового возраста (Konishchev, 2013; Schirrmeister, 2022).

Материал едомной свиты представляет собой монотонный по составу пылеватый суглинок (Schirrmeister, 2020; Strauss, 2012) с высоким содержанием сегрегационного и жильного льда, ненарушенное строение которого свидетельствует о том, что с момента промерзания толща постоянно пребывала в мерзлом состоянии (Konishchev, 1993). В минеральном составе едомной свиты преобладают кварц и полевые шпаты в форме окатанных зерен (Schirrmeister, 2022, 2022a; Shmelev, 2021). Морфология и размер зерен свидетельствует о том, что происхождение осадка связано с эоловым и флювиальным переносом в потоках низкой энергии (Schwamborn, 2023). Зерна тяжелых минеральных фаз, в частности магнетита, в обломочном материале отсутствуют, что объясняется особенностями эолового переноса и с финальным отложением в субаэральными условиями или в мелких часто пересыхающих водоемах. Минеральные новообразования представлены мелкодисперсными окислами железа в зонах концентрирования порового раствора, а также в плотных конкрециях. Удельная магнитная восприимчивость материала на уровне $5 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг} \dots 20 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ определяется присутствием кристаллов магнетита, который, вероятно, имеет аутигенное происхождение. Материал вечномерзлой толщи характеризуется нейтральной и слабощелочной реакцией, а таяние содержащегося в ней льда приводит к образованию пресной и ультрапресной воды. Органическое вещество представляет собой мелкодисперсный детрит, а его растворимая фракция отличается высокой подвижностью. Такие условия благоприятны для формирования аутигенных железистых минералов, в частности магнетита (Водяницкий, 2008). Толща содержит фрагменты и полные профили погребенных почв.

В обнажении высотой 36 м с шагом по глубине 7 см с четырехкратной повторностью на каждой глубине измерена магнитная восприимчивость материала едомной свиты. Для измерений использован портативный прибор КТ-5 (Geofizika Bno), обеспечивающий чувствительность 0.01×10^{-3} единиц SI, что близко к $0.1 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ удельной магнитной восприимчивости полиминеральных дисперсных пород. Это в 50 и более раз меньше диапазона изменений удельной восприимчивости в изучаемой толще и позволяет получить достоверные оценки изменчивости показателя с глубиной. По измерениям на каждой глубине находили среднее из 4-х замеров магнитной восприимчивости, средние значения сглаживали по 11 точкам, а затем нормировали для приведения к диапазону от 0 до 1 в относительных единицах для сопоставления распределения магнитной восприимчивости с вычисленными значениями степени трансформации осадка при почвообразовании в сезонноталом слое. Для оценки возраста осадка использовали детальные радиоуглеродные

датировки осадка едомной свиты В.В.Куницкого на мысу Быковский (Schirrmeister, 2011).

Результаты

Распределение удельной магнитной восприимчивости осадка едомной свиты по глубине толщи имеет периодическую форму (рис.1). Удельная магнитная восприимчивость материала возрастает в грубогумусных горизонтах погребенных почв (зоны максимумов на рис.1) и снижается в фоновой почвообразующей породе, которая представляет собой незатронутый почвообразованием осадок (зоны низкой восприимчивости на рис.1). Картина распределения магнитной восприимчивости показывает, что относительно высокое содержание аутигенного магнетита наблюдается в погребенных почвах, которые формировались в условиях увеличения времени жизни осадка в сезонноталом слое в результате замедления осадконакопления.

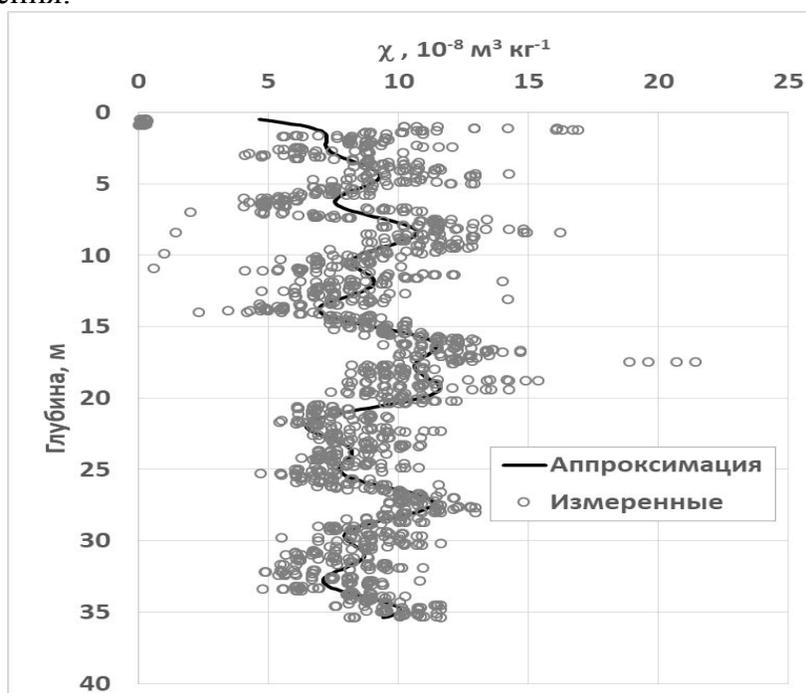


Рис. 1. Магнитная восприимчивость вечномерзлого осадка едомной свиты с погребенными почвами. Измеренные значения и аппроксимация функцией вида суммы синусов

На рисунке 2 показано распределение радиоуглеродного возраста осадка едомной свиты в разрезе на мысу Быковский по данным В.В.Куницкого (Schirrmeister, 2011). Кривая распределения возраста имеет ступенчатую форму, что объясняется непостоянством темпов поступления осадка на поверхность. Динамка

интенсивности потока осадка, поступающего на поверхность, контролирует распределение времени жизни осадка в сезонноталом слое, от которого в свою очередь зависит накопление аутигенного магнетита и магнитная восприимчивость. В результате распределение магнитной восприимчивости содержит информацию об истории изменений интенсивности потока осадка, поступающего на поверхность. Для количественной интерпретации этой информации предлагается модель, которая увязывает распределение степени трансформации осадка в сезонноталом слое под влиянием поверхностных факторов с показателями динамики интенсивности потока осадка, поступающего на поверхность почвы.

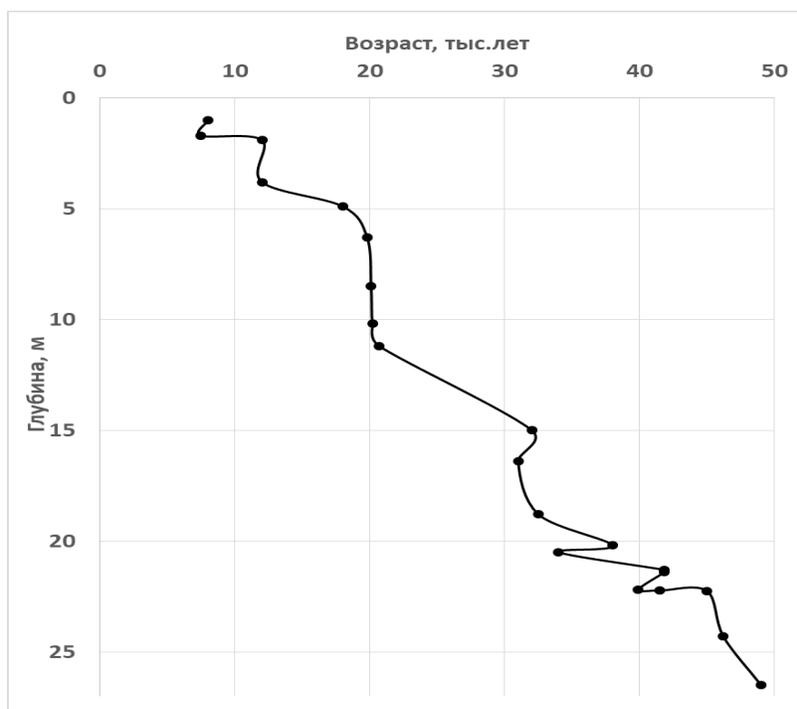


Рис. 2. Радиоуглеродный возраст вечномерзлого осадка едомной свиты в разрезе на мысу Быковский по данным В. В. Куницкого (Schirrmeister, 2011)

Модель формирования почвенно-осадочной последовательности

Предлагаемая модель описывает образование вечномерзлой толщи с погребенными почвами как совокупность двух процессов: накопления осадка с непостоянной во времени интенсивностью потока и накопления аутигенного магнетита в почве сезонноталого слоя и возрастающей при этом магнитной восприимчивости. Модель включает четыре модуля:

Модуль 1 аппроксимации распределения магнитной восприимчивости по глубине толщи периодической функцией (1),

$$\chi(h) = \sum_{i=1}^n (B + A \sin(\frac{2\pi(h+\varphi)}{H})) \quad (1)$$

где χ – магнитная восприимчивость, относительные единицы; h – глубина, м; i и n – номер и число слагаемых в сумме гармоник; B – уровень магнитной восприимчивости, вокруг которого происходят ее колебания, относительные единицы; A – амплитуда колебаний магнитной восприимчивости с увеличением глубины, относительные единицы; φ – фазовый сдвиг, м; H – период колебаний магнитной восприимчивости с увеличением глубины, м. С увеличением n до 4 коэффициент детерминации, характеризующий подобие результатов расчёта измеренным данным, возрастает до 0.9, а при дальнейшем увеличении n изменяется незначительно. Это позволяет ограничить сумму (1) четырьмя слагаемыми и избежать увеличения числа неопределенных коэффициентов.

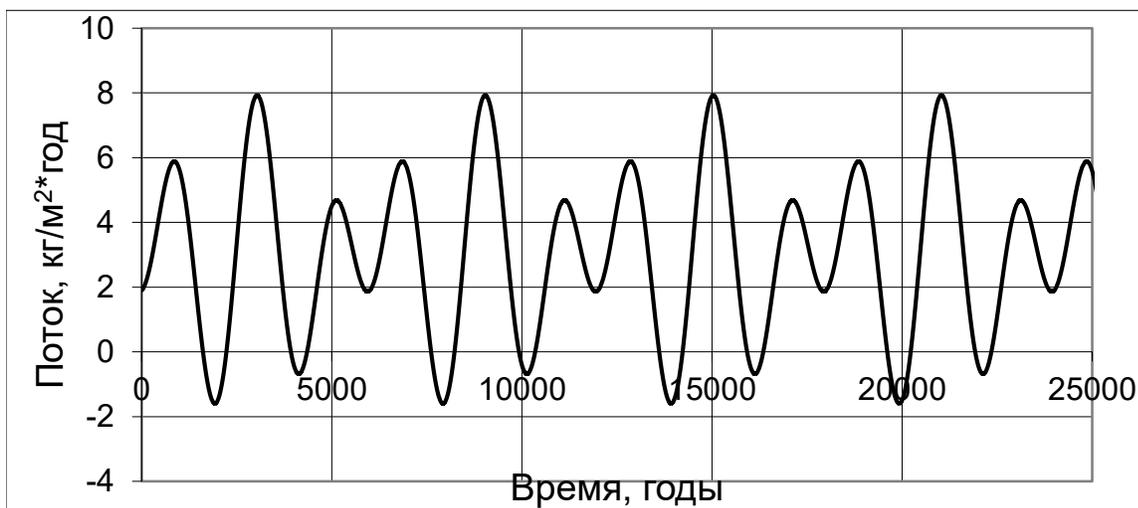


Рис. 3. Динамика интенсивности потока осадка, поступающего на поверхность. Изменения потока осадка описываются функцией вида суммы синусов

Модуль 2, описывающий поступление осадка на поверхность с непостоянной скоростью:

$$I(\tau) = \sum_{i=1}^n (B + A \sin(\frac{2\pi(\tau+\varphi)}{T})) \quad (2)$$

где: $I(\tau)$ – интенсивность потока осадка, поступающего на поверхность почвы, кг/м² год; τ – время, годы; i и n – номер и число слагаемых в сумме гармоник, $n = 4$; B – уровень интенсивности потока осадка, поступающего на поверхность почвы, вокруг которого происходят его колебания, кг/(м² год); A – амплитуда колебаний интенсивности потока осадка, поступающего на поверхность почвы, кг/(м² год); φ – фазовый сдвиг, годы; T – период

колебаний интенсивности потока осадка, поступающего на поверхность почвы, годы. Здесь, как и в (1), используется функция вида суммы синусов с $n=4$, но глубина h заменена переменной времени τ . Динамика интенсивности потока осадка, поступающего на поверхность, показана на рисунке 3.

Модуль 3 вычисления распределения возраста осадка по глубине ($Age(h)$) как продолжительность времени от момента наблюдения $T(0)$ до его погружения до глубины h $T(h\tau)$ (рис.4):

$$Age(h) = T(h\tau) - T(0).$$

Модуль 4 распределения времени жизни осадка в сезонноталом слое (Lt) по глубине толщи h (рис. 5), как возраста подошвы ($Ageb$) и кровли ($Ageu$) этого слоя: $Lt(h) = Ageb - Ageu$.

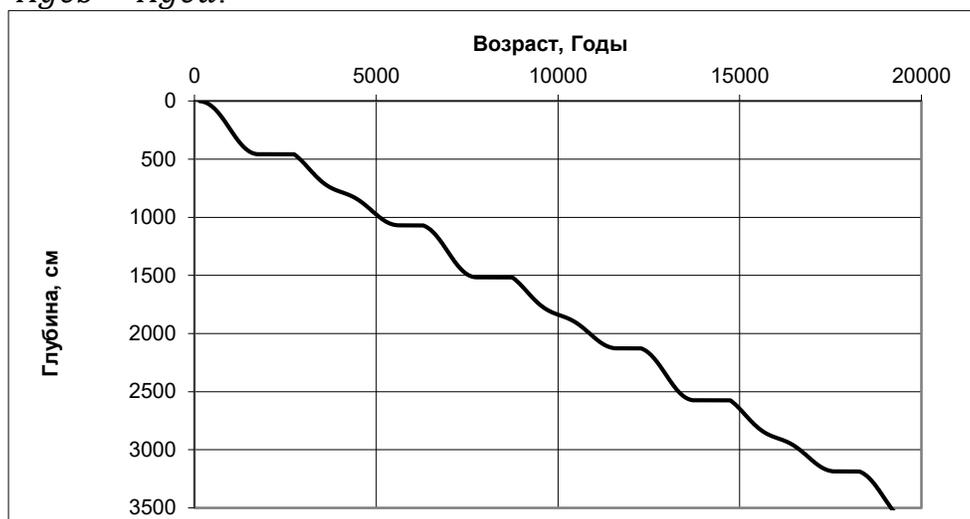


Рис. 4. Профиль возраста осадка в условиях периодического режима интенсивности потока осадка, поступающего на поверхность

Предполагая, что глубина сезонноталого слоя и скорость трансформации осадка в нем не изменяется, степень трансформации осадка (рис.5) принимается соответствующей времени его жизни в сезонноталом слое. Коэффициенты в уравнении (2), определяющие динамику интенсивности потока осадка, поступающего на поверхность, подбираются по критерию сходства вычисленного распределения степени трансформации осадка с измеренным распределением магнитной восприимчивости. Значения подобранных коэффициентов (таблица) обеспечивают близость глубин залегания экстремумов на обеих кривых рисунка 5.

Работа модели с указанными в таблице коэффициентами адекватно описывает основные особенности динамики осадконакопления, благодаря которой

сформировался осадок едомной свиты. Неполное соответствие вычисленной степени трансформации осадка при почвообразовании измеренному распределению магнитной восприимчивости объясняется тем, что предлагаемая модель не учитывает биоклиматических условий формирования толщи, которые приводят к изменениям глубины сезонного протаивания и к изменениям скорости трансформации материала за счет накопления магнитных минеральных фаз.

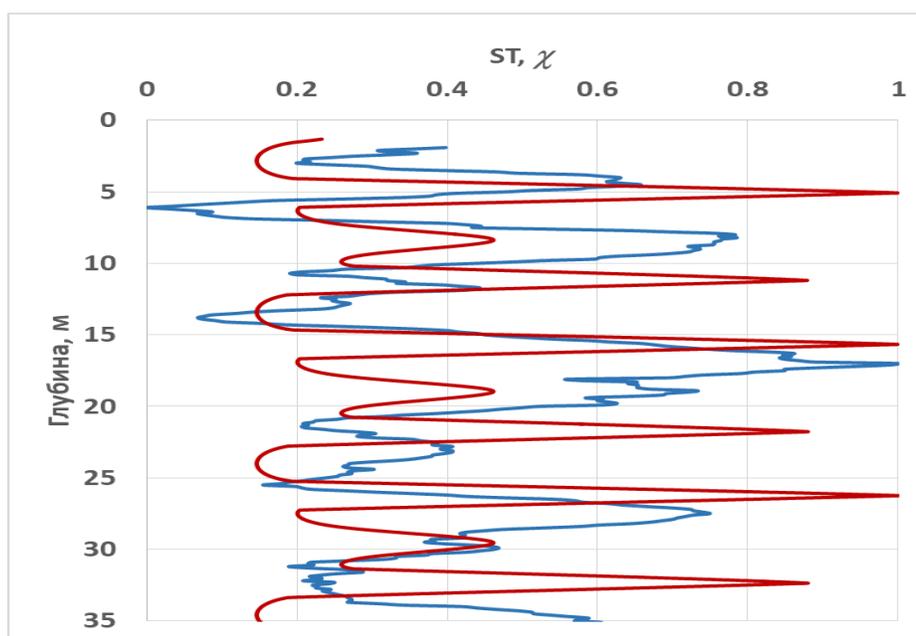


Рис. 5. Степень трансформации осадка в сезонноталом слое (красная, ST в относительных единицах) и измеренные значения магнитной восприимчивости (синяя, χ в относительных единицах)

Таблица 1. Коэффициенты для вычисления динамики накопления осадка, подобранные по критерию сходства вычисленной степени трансформации осадка и измеренной магнитной восприимчивости. Римские цифры в заголовке таблицы обозначают номера слагаемых в сумме $I = \sum A \cdot \sin(b \cdot \tau + f)$, где τ - время

Описание коэффициента	I	II	III	IV
A - амплитуда колебаний интенсивности потока осадка, кг/м ² год	2.8	2	0.5	0.3
b - период колебаний интенсивности потока осадка, годы	2000	3000	110	50
f - фазовый сдвиг в колебаниях интенсивности потока осадка, годы	1500	600	45	15

Заключение

Распределение магнитной восприимчивости материала вечномерзлого осадка с погребенными почвами отражает динамику его накопления, благодаря увеличению этого показателя в сезонноталом слое за счет вероятного накопления аутигенного магнетита. Предлагаемая модель формирования почвенно-осадочной последовательности описывает поступление осадка на поверхность с непостоянной интенсивностью потока и трансформацию осадка в сезонноталом слое. Модель позволяет определять распределение степени трансформации осадка по глубине вечномерзлой толщи. На примере магнитной восприимчивости осадка едомной свиты найдены значения коэффициентов, которые в явном виде определяют динамику осадконакопления.

Благодарность

Работа выполнена в рамках темы государственного задания 122040500038-3.

Литература

- Водяницкий Ю.Н., Мергелов Н.С., Горячкин С.В. (2008) Диагностика оглеения в условиях низкого содержания оксидов железа (на примере почв тундры Колымской низменности). *Почвоведение* **3**, 261–279. DOI 10.1134/S1064229308030010
- Губин С.В., Лупачев А.В. (2020) Почвообразование в тундровой зоне приморских низменностей северо-востока Сибири. *Почвоведение* **10**, 1182–1191. DOI 10.31857/S0032180X2010008
- Konishchev V. (2013) The Nature of Cyclic Structure of the Ice Complex, East Siberia. *Geogr. Environ. Sustain* **6**, 4–20. DOI 10.24057/2071-9388-2013-6-3-4-20
- Konishchev V.N., Rogov V.V. (1993) Investigations of Cryogenic Weathering in Europe and Northern Asia. *Permafrost Periglacial Processes* **4**, 49–64. DOI 10.1002/ppp.3430040105
- Schirrmeyer L., Dietze E., Matthes H., Grosse G., Strauss J., Laboor S., Ulrich M., Kienast F., Wetterich S. (2020) The Genesis of Yedoma Ice Complex Permafrost – Grain-Size Endmember Modeling Analysis from Siberia and Alaska. *E&G Quaternary Science Journal* **69**, 33–53. DOI 10.5194/egqsj-69-33-2020
- Schirrmeyer L., Fedorov A.N., Froese D., Iwahana G., van Huissteden K., Veremeeva A. (2022) Yedoma Permafrost Landscapes as past Archives, Present and Future Change Areas. *Frontiers in Earth Science* **10**. DOI 10.3389/feart.2022.929873
- Schirrmeyer L., Kunitsky V.V., Grosse G., Wetterich S., Meyer H., G. Schwamborn G., Babiy O., Derevyagin A., Siegert C. (2011) Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on North-East Siberian Arctic coastal lowlands and islands. *Quaternary International* **241**, 3–25. DOI 10.1016/j.quaint.2010.04.004

- Schirrmeister L., Wetterich S., Schwamborn G., Matthes H., Grosse G., Klimova I., Kunitsky V.V., Siegert C. (2022a) Heavy and light mineral associations of late Quaternary permafrost deposits in Northeastern Siberia. *Frontiers in Earth Science* **10**, 741932. DOI 10.3389/feart.2022.741932
- Schwamborn G., Schirrmeister L., Mohammadi A., Meier H., Kartosiia A., Maggioni F., Strauss J. (2023) Fluvial and permafrost history of the lower Lena River, north-eastern Siberia, over late Quaternary time. *Sedimentology* **70**, 235–258. DOI /10.1111/sed.13037
- Shmelev D., Cherbunina M., Rogov V., Opfergelt S., Monhonval A., Strauss J. (2021) Reconstructing permafrost sedimentological characteristics and post-depositional processes of the Yedoma Stratotype Duvanny Yar, Siberia. *Frontiers in Earth Science* **9**, 727315. DOI 10.3389/feart.2021.727315
- Strauss J., Schirrmeister L., Wetterich S., Borchers A., Davydov, S. P. (2012) Grain-size properties and organic-carbon stock of yedoma ice complex permafrost from the Kolyma lowland, Northeastern Siberia. *Glob. Biogeochem. Cycles* **26**, GB3003. DOI 10.1029/2011GB004104

УДК 631.4

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ КАК ФАКТОР УСТОЙЧИВОСТИ ПАЛЕОКРИОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Поляков Д.Г.¹, Архангельская Т.А.², Рябуха А.Г.¹, Ковда И.В.³

¹Институт степи УрО РАН, Оренбург, Российская Федерация
polakovdg@yandex.ru

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
t.a.arhangelskaia@yandex.ru

³Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Российская Федерация
ikovda@mail.ru

SOIL TEMPERATURE REGIME AS A FACTOR OF STABILITY OF PALEOCRYOGENIC SOILSCAPE STRUCTURE

Polyakov D.G.¹, Arkhangelskaya T.A.², Ryabukha A.G.¹, Kovda I.V.³

¹Steppe Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation
polakovdg@yandex.ru

²Faculty of Soil Science, MSU, Moscow, Russian Federation
t.a.arhangelskaia@yandex.ru

³Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russian Federation
ikovda@mail.ru

Annotation: Temperature regime of paleocryogenic soil complexes was studied for different parent rocks and climate. Winter soil temperatures varied asynchronously in different parts of studied complexes. Laterally variable soil temperature is responsible for lateral differentiation of soil properties and hence is a factor of stability of paleocryogenic soilscape structure.

Введение

В палеокриогенных почвенных комплексах отмечается реликтовая обусловленность структуры почвенного покрова и наличие ряда палеопризнаков (Макеев, Дубровина, 1990). Широко известным примером являются почвы центра Восточно-Европейской равнины, где палеокриогенез оказал существенное влияние на направление почвообразовательного процесса в сопряженных почвах посредством реликтового криогенного микрорельефа (Величко и др., 1996; Алифанов и др., 2010; Макеев, 2012; Овчинников и др., 2020).

Пожалуй, наиболее изученными палеокриогенными почвами Восточно-Европейской равнины являются почвы Владимирского ополья, в особенности расположенного в его пределах опытного поля Верхневолжского ФАНЦ (Владимирский НИИСХ). Интересным является то, что на пашне, в условиях сглаженного многолетней вспашкой микрорельефа, сохраняется пространственная

неоднородность почвенного покрова, свойств почв и почвенных режимов (Архангельская и др., 2007; Гончаров и др., 2008; Шеин, Трошина, 2012).

Почвенные комбинации являются открытыми системами (Фридланд, 1972), а формирование и поддержание структур в открытых диссипативных системах обычно связано с потоками энергии и вещества (Гленсдорф, Пригожин, 2003; Трубецков, 2004). Латеральная неоднородность потоков энергии в сложном организованном почвенном покрове определяет температуру почвы и ее пространственную вариабельность. Температура почвы является одним из внешних факторов почвообразования, разносторонне влияет на почвы и в известной мере зависит от свойств самих почв. Из-за этого температура может являться фактором формирования обратных связей в системе «свойства – функционирование» и закрепления как реликтовых свойств, так и реликтового рисунка структуры почвенного покрова (Архангельская, 2003, 2012; Arkhangel'skaya, 2014).

В связи с этим встает вопрос об универсальности предложенного для почв Владимирского ополья температурного механизма обратных связей в поддержании сформированной палеокриогенезом структуры почвенного покрова. Ответ на этот вопрос требует привлечения данных исследований в других физико-географических условиях, на других почвообразующих породах, при сохранившемся микрорельефе. Удачными объектами для этого являются палеокриогенные комплексы с выраженным микрорельефом в степной зоне.

На верхнемеловых отложениях маастрихтского яруса (C₁₂m), представленных белым писчим мелом, распространен полигонально-бугристый микрорельеф, получивший название меловых полигонов. Микрорельеф представлен регулярной серией бугров высотой 0.2–0.4 м и размером около 5 м в поперечнике и разделяющих их ложбинообразных микропонижений. Особенностью меловых полигонов является наличие в центральной части незадернованных белых пятен меловой породы диаметром около 2 м.

К берегам озер, низким речным террасам, днищам долин приурочен полигонально-бугристый микрорельеф (туфуры), представленный серией невысоких заросших бугров, разделенных понижениями шириной от 0.3 до 0.6 м. Размер бугров составляет в поперечнике от 1.5 до 3.0 м, высота – от 0.2 до 0.4 м. Форма бугров прямоугольная, округлая или куполообразная, с крутыми склонами и уплощенной вершиной. Микрорельеф имеет строго упорядоченное расположение и образует полигонально-сетчатый рисунок, который хорошо читается на космических снимках.

Целью работы было исследование роли температурного режима сопряженных почв в формировании обратных связей в системе «свойства – функционирование» как фактора устойчивости структуры почвенного покрова в разных почвенно-климатических условиях.

Объекты и методы

Расположение исследованных в 1998–2004 и 2018–2023 гг. участков представлено на рис. 1.

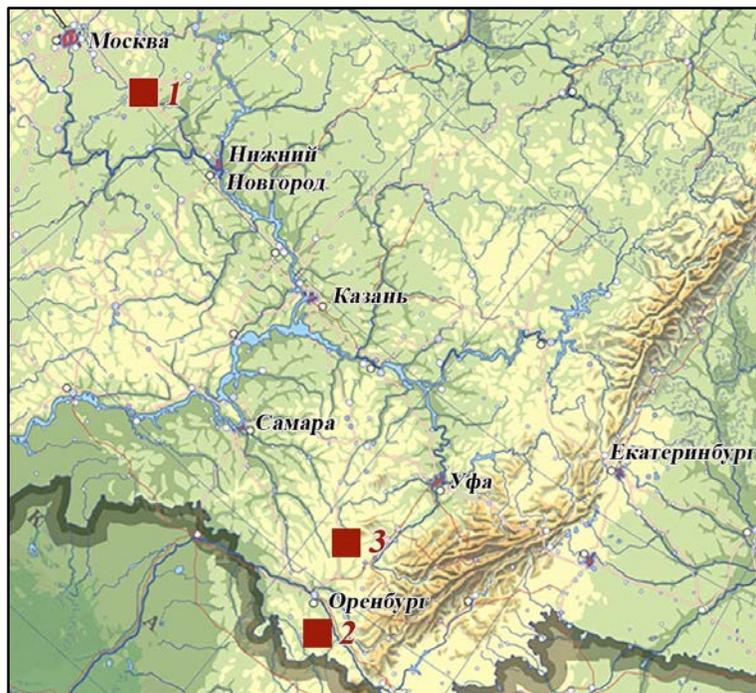


Рис. 1. Расположение ключевых участков: 1) Опытное поле Верхневолжского ФАНЦ; 2) Участок с меловыми полигонами; 3) Туфуровое поле.

Опытное поле Верхневолжского ФАНЦ располагается в подзоне южной тайги (рис. 1). Почвообразующие породы – лессовидные покровные суглинки. Структура почвенного покрова представлена комбинациями, насчитывающими от трех до шести почвенных разностей, с приуроченностью компонентов к определенным элементам нивелированного в результате многолетней распашки палеомерзлотного микрорельефа. Почвы со вторым гумусовым горизонтом располагаются в межблочьях, а менее гумусированные и остаточно-карбонатные разности приурочены к палеомерзлотным блокам (Макеев, Дубровина, 1990; Величко и др., 1996; Шеин и др., 2001).

Комплексный почвенный покров меловых полигонов расположен в степной зоне, в пределах Подуральского плато (рис. 1). Почвообразующие породы – тонкодисперсные отложения с содержанием мела от 60 до 90%. Почвенный комплекс представлен сочетанием трех почвенных разностей, приуроченных к определенным элементам палеокриогенного микрорельефа. В центральных частях микроповышений формируются криоструктурнометаморфические солончаковые почвы, на микросклонах палеомерзлотных блоков – светлогумусовые

криоструктурнометаморфические солончаковые почвы, в микропонижениях – светлогумусовые солончаковатые почвы (Поляков и др., 2024б).

Комплексный почвенный покров туфурового поля располагается в степной зоне, на восточной окраине Общего Сырта (рис. 1). Почвообразующие породы – гажа (землистый гипс) с содержанием гипса около 70%. Палеомерзлотный комплекс идентичен по строению комплексу на меловых полигонах, но более выражен по микрорельефу. Структура почвенного покрова представлена комплексом солончака криоструктурнометаморфического карбонатного палеокриотурбированного на туфурах и перегнойно-гумусовой криоструктурнометаморфической карбонатной солончаковой сильнозасоленной палеокриотурбированной почвы в межблочных понижениях.

Общей особенностью участков меловых полигонов и туфуров является сохранившийся реликтовый криогенный микрорельеф, который обуславливает пространственную дифференциацию свойств почв, характерных для степной зоны. Почвы микроповышений засолены с поверхности и практически не содержат гумуса. Почвы микропонижений богаты гумусом и засолены в меньшей степени, чем почвы микроповышений, с максимумом солей на небольшой глубине. Кроме того, морфология почв осложнена комплексом разновозрастных криогенных признаков, дифференцированных по микрорельефу (Рябуха и др., 2022). К реликтовым признакам отнесены палеомерзлотные двухъярусные жилы в микропонижениях; криотурбации, пятна излияния минеральной массы и измятые гумусированные прослойки, характерные для почв микроповышений. Современные криогенные признаки, представленные постшлировой структурой почвы и неоднородным содержанием крупнозема, тоже характерны для микроповышений. Формирование постшлировой почвенной структуры, проявляющейся в слое сезонного промерзания, связано с образованием ледяных шлиров и их последующим вытаиванием. Важным последствием шлирообразования является морозное пучение в области микроповышений. Хорошая выраженность современного микрорельефа связана как с невозможностью распашки обсуждаемых почв в связи с высокой засоленностью и бедностью элементами минерального питания (Поляков и др., 2024а), так и с дифференцированным морозным пучением, способным поддерживать микрорельеф (Горбунов и др., 1999).

Температуру в профиле сопряженных почв на участке Владимирского ополья измеряли с помощью стационарных датчиков электротермометра «Дана-терм 1501». На меловых полигонах и туфурах измерения проводили с использованием автономных регистраторов температуры i-button. В лаборатории определяли зависимость температуропроводности почв от влажности (Архангельская, 2004), а также температуру промерзания почв разной степени засоления (Поляков и др., 2024б). Гранулометрический состав определяли пипет-методом с использованием

пирофосфатной диспергации (Теории и методы..., 2007), содержание органического углерода – методом сухого сжигания в токе кислорода (Когут и др., 1993).

Результаты

Сопоставим годовую динамику температуры почв, входящих в исследованные комплексы. Особое внимание будем обращать на особенности температурного режима в зимний период, в частности, на глубину проникновения нулевой изотермы, а также на сроки прохождения температуры через ноль.

В комплексном почвенном покрове Владимирского ополья на распаханном участке летом лучше всего прогревались почвы ныне захороненных палеомерзлотных микроповышений, а хуже всего – почвы палеомикропонижений (Архангельская и др., 2005, 2007, 2008). Как хорошо видно на рис. 2, в течение осени и зимы 2003–2004 гг. почва палеомикропонижения охлаждалась и промерзала медленнее. На глубине 10 см температура этой почвы перешла нулевую отметку только 24 декабря, на две недели позже, чем температура почвы палеомерзлотного блока. Максимальная глубина проникновения нулевой изотермы в зимний период в почве блока составила 30 см, в межблочье нулевая изотерма достигала лишь 10 см.

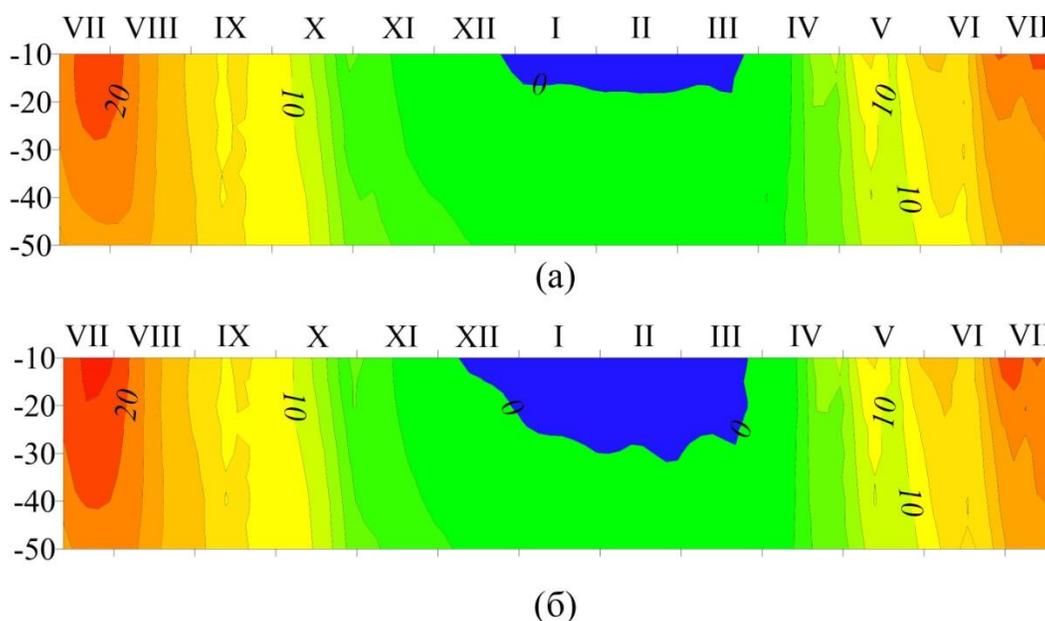


Рис. 2. Термохроноизоплеты почв комплексного почвенного покрова Владимирского ополья в период с июля 2003 г. по июль 2004 г.: а) палеопонижение; б) палеоповышение (Архангельская и др., 2008).

Зимой 2019–2020 гг. на участке с меловыми комплексами наблюдались сходные закономерности (Поляков и др., 2024б). В начале зимы происходило

быстрое охлаждение почв. После выпадения снега во второй декаде декабря охлаждение замедлилось, а продвижение нулевой изотермы вглубь профиля на контрастных элементах микрорельефа существенно различалось. На микроповышении, для которого характерна наиболее высокая теплопроводность (Поляков и др., 2021), нулевая изотерма медленно, но устойчиво продолжала опускаться вглубь вплоть до конца зимы. В первую декаду марта отмечалась ее непродолжительная стабилизация, затем быстрый уход вверх и исчезновение в третьей декаде марта. В пределах микрозападины проникновение нулевой изотермы вглубь сначала замедлялось, а в конце декабря практически остановилось (рис. 3), что совпадало с выпадением снега мощностью 19–20 см. В январе и феврале глубина расположения нулевой изотермы практически не изменялась до резкого потепления в начале марта. В пределах микроповышения глубина проникновения нулевой изотермы достигала 65 см, а в микропонижении – 30 см (рис. 3). В теплое время года почвы микроповышения были теплее, чем почвы микрозападины, как и в случае палеокриогенных комплексов Владимирского ополья.

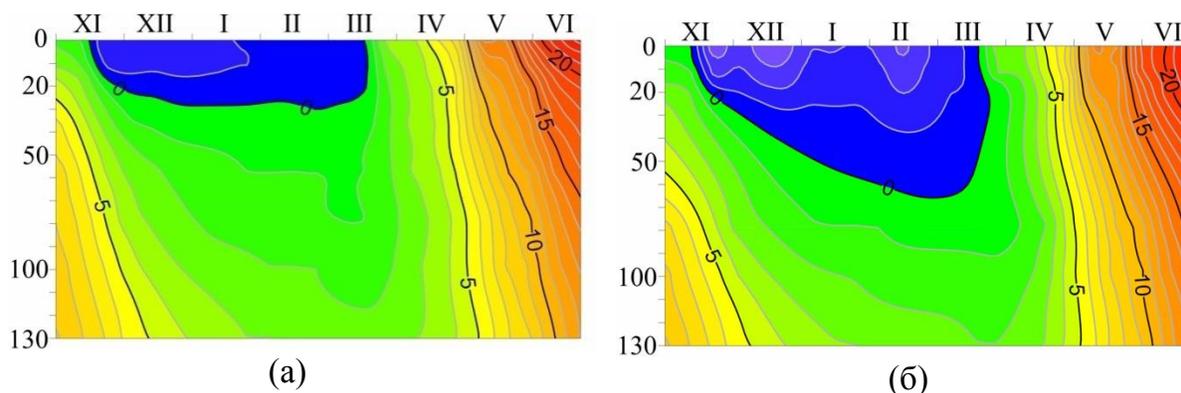


Рис. 3. Термохроноизоплеты почв комплексного почвенного покрова меловых полигонов в период с ноября 2019 г. по июнь 2020 г.: а) микропонижение; б) микроповышение (Поляков и др., 2024).

Аналогичные результаты были получены для комплексного почвенного покрова туфурового поля: зимой 2021–2022 гг. быстрее охлаждалось микроповышение (рис. 4а). Снижение температуры началось в первой декаде ноября и продолжалось устойчивым и равномерным продвижением нулевой изотермы вглубь до середины марта 2022 года, когда она достигла глубины 50 см. Оттаивание почвы микроповышения началось в начале апреля, происходило в основном с поверхности почвы и продолжалось почти месяц. Это связано с большим количеством льда, образующимся при промерзании микроповышений, и мощностью промерзшего слоя. Почва микропонижения начала охлаждаться чуть позже (рис. 4б).

Продвижение нулевой изотермы вглубь остановилось на полтора месяца раньше, чем на микроповышении, достигнув глубины 20 см. Начало оттаивания на повышении и в понижении совпадало по времени, и происходило очень быстро, продлившись лишь 2 сут.

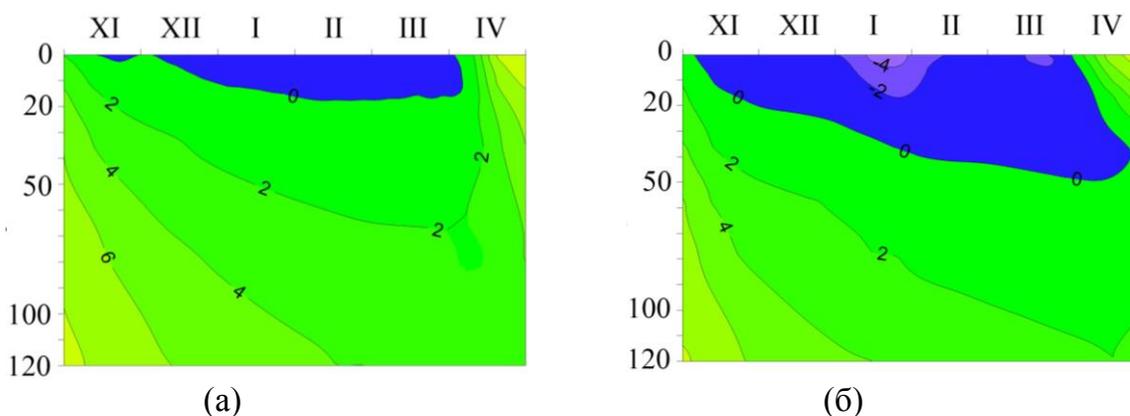


Рис. 4. Термохроноизоплеты почв комплексного почвенного покрова туфурового поля в период с ноября 2021 г. по апрель 2022 г.: а) микропонижение; б) микроповышение.

Обсуждение

Температура почв палеокриогенных ландшафтов имеет закономерную пространственно-временную неоднородность. Микроповышения, в том числе и ныне захороненные на распаханых участках, летом прогреваются быстрее, а зимой промерзают на большую глубину, чем почвы межблочий.

Элементы самоорганизации в функционировании палеокриогенного комплексного почвенного покрова Владимирского ополья в условиях захороненного микрорельефа обсуждались ранее. Более гумусированные почвы реликтовых межблочьев имеют существенно меньшую теплопроводность по сравнению с менее гумусированными почвами палеомерзлотных блоков (Архангельская, 2004). Поэтому при весенне-летнем прогревании почвы межблочьев оказываются холоднее, чем почвы блоков, а в зимний период промерзают на меньшую глубину и оттаивают быстрее (Архангельская и др., 2005, 2007, 2008). В результате различия температурных режимов почв комплекса сказываются на различиях в скорости минерализации органического вещества, а разница в сроках протаивания приводит к тому, что преимущественный сток талых вод предположительно идет через участки, приуроченные к палеомерзлотным блокам, что приводит к их дополнительному обогащению свежесформированными гумусовыми веществами. Оба эти фактора поддерживают существующую разницу в содержании гумуса в почвах комплекса (Архангельская, 2003). В итоге, несмотря на полную захороненность реликтового микрорельефа, гидротермические режимы разных элементов комплекса имитируют

реликтовые условия их формирования и выступают элементом обратной связи в системе «свойства – функционирование» обеспечивая поддержание реликтовых признаков и палеокриогенной структуры почвенного покрова (Архангельская, 2003, 2012; Arkhangel'skaya, 2014).

В почвах степных палеокриогенных комплексов отмечаются сходные с комплексами Владимирского ополья тенденции пространственно-временного изменения температуры. В них также отмечаются элементы поддержания реликтовых свойств и палеокриогенной структуры почвенного покрова. Поддержание реликтовых свойств обусловлено современными процессами и их дифференциацией по микрорельефу. Здесь, таким же образом как во Владимирском ополье, обеспечивается разница в содержании гумуса в почвах на разных элементах микрорельефа.

Также выявлено воздействие криогенных процессов, проявление которых дифференцировано по микрорельефу. Промерзание почв степных комплексов определялось несколькими факторами: температуропроводностью почв, мощностью снега и степенью засоленности почв, влияющей на температуру замерзания почвенной влаги. Микроповышения промерзали глубже за счет большей температуропроводности и меньшей мощности снега. Регрессивно-аккумулятивное распределение водорастворимых солей по профилю почв микроповышений не мешало промерзанию, так как в пределах проникновения нулевой изотермы температура почвы была ниже температуры замерзания почвенного раствора. Микропонижения промерзали меньше за счет меньшей температуропроводности и глубокого снега. Элювиально-иллювиальное распределение водорастворимых солей по профилю почв микропонижений блокировало промерзание в слое максимального скопления солей, приуроченном в основном к глубинам около 20 см. Это приводило к переохлаждению почвы без ее промерзания. В результате почвы микроповышений промерзали на глубину проникновения нулевой изотермы, а почвы микропонижений – до уровня максимального скопления солей.

При промерзании почв микроповышений отмечалось формирование шлировой криотекстуры и избыточное льдовыделение, приводящие к морозному пучению. Промерзание микропонижений в основном сопровождалось формированием массивной криотекстуры. Вследствие дифференцированного морозного пучения в степных комплексах происходит поддержание реликтового криогенного микрорельефа. Важным следствием глубокого промерзания микроповышений также является их влагозарядка и накопление солей, так как известно, что вместе с влагой к фронту промерзания перемещаются растворенные вещества (Bing et al., 2015). Скопившаяся за зиму влага, оттаивая, испаряется с поверхности почвы микроповышения, поддерживая высокий уровень засоления и регрессивно-аккумулятивное распределение солей.

Таким образом, температурный режим в исследованных комплексах степной зоны тоже является элементом, обеспечивающим обратные связи в системе «свойства – функционирование».

Заключение

В изученных палеокриогенных почвенных комплексах, сформировавшихся и функционирующих в разных условиях, тенденции пространственно-временной неоднородности температуры почв были одинаковыми. Отмечалась асинхронность годового хода температуры почв, составляющих почвенный комплекс. Почвы палеомерзлотных блоков охлаждались и нагревались быстрее, а межблочных понижений – медленнее. В зимнее время почвы межблочных понижений были теплее, а повышений – холоднее; в летнее время – наоборот. Нулевая изотерма в зимнее время глубже проникала на микроповышениях.

Разница в температурных режимах почв комплекса обуславливается различием свойств, обеспечивающих теплообмен на деятельной поверхности и внутри почв. Пространственная неоднородность температурного режима почв приводит к неоднородности протекания почвенных процессов, которые поддерживают пространственную неоднородность свойств почв, формирующих выявленные особенности температурного режима. Строгая приуроченность режимов, процессов и современных свойств почв к элементам палеомерзлотного блока, а также сохранность реликтовых свойств почв позволяет сделать вывод о существенной роли температурного режима почвы как элемента поддержания реликтовой структуры почвенного покрова.

Благодарность

Работа выполнена по темам НИР Института степи УрО РАН № АААА-А 21-121011190016-1 и Почвенного института им. В.В. Докучаева FGUR-2022-0013.

Литература

Алифанов В.М., Гугалинская Л.А., Овчинников А.Ю. (2010) Палеокриогенез и разнообразие почв центра Восточно-Европейской равнины. М.: ГЕОС. 160 с.

Архангельская Т.А. (2003) Генезис сезоннопромерзающих серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом (на примере Владимирского ополья). *Криосфера Земли* VII(1), 39–48.

Архангельская Т.А. (2012) Температурный режим комплексного почвенного покрова. М.: ГЕОС. 282 с.

Архангельская Т.А. (2004) Температуропроводность серых лесных почв Владимирского ополья. *Почвоведение* 3, 332–342.

Архангельская Т.А., Бутылкина М.А., Мазиров М.А., Прохоров М.В. (2007) Свойства и функционирование пахотных почв палеокриогенного комплекса Владимирского ополья. *Почвоведение* **3**, 261–271.

Архангельская Т.А., Губер А.К., Мазиров М.А., Прохоров М.В. (2005) Температурный режим комплексного почвенного покрова Владимирского ополья. *Почвоведение* **7**, 832–843.

Архангельская Т.А., Прохоров М.В., Мазиров М.А. (2008) Годовая динамика температуры пахотных почв палеокриогенных комплексов Владимирского ополья. *Криосфера Земли* **XII**(3), 80–86.

Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.П., Порожнякова О.М. (1996) Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. М.: Наука. 150 с.

Гленсдорф П., Пригожин И. (2003) Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Едиториал УРСС. 280 с.

Горбунов А.П., Северский Э.В., Титков С.Н. (1999) Туфуры гор и равнин Казахстана. *Криосфера Земли* **3**, 23–30.

Гончаров В.М., Тымбаев В.Г., Фаустова Е.В. (2008) Латеральная изменчивость агрофизического состояния комплексного почвенного покрова. *Почвоведение* **10**, 1224–1233.

Когут Б.М., Большаков В.А., Фрид А.С., Краснова Н.М., Бродский Е.С., Кулешов В.И. (1993) Аналитическое обеспечение мониторинга гумусового состояния почв. М.: Изд-во РАСХН. 73 с.

Макеев А.О., Дубровина И.В. (1990) География, генезис и эволюция почв Владимирского ополья. *Почвоведение* **7**, 5–25.

Макеев А.О. (2012) Поверхностные палеопочвы лёссовых водоразделов Русской равнины. М.: Молнет. 300 с.

Овчинников А.Ю., Алифанов В.М., Худяков О.И. (2020) Влияние палеокриогенеза на формирование серых лесных почв центральной России. *Почвоведение* **10**, 1170–1181.

Поляков Д.Г., Архангельская Т.А., Рябуха А.Г., Ковда И.В. (2021) Температуропроводность криоморфных почв степных комплексов на меловых породах. *Почвоведение* **9**, 1051–1060.

Поляков Д.Г., Ковда И.В., Рябуха А.Г. (2024а) Почвы меловых полигонов Подуральского плато: морфология, свойства и классификация. *Почвоведение* **1**. В печати.

Поляков Д.Г., Рябуха А.Г., Архангельская Т.А., Ковда И.В. (2024б) Промерзание меловых криоморфных комплексов Оренбургской области: температурный режим почв и проявление криогенных процессов в почвенном профиле. *Почвоведение* **6**. В печати.

Рябуха А.Г., Поляков Д.Г., Ковда И.В., Стрелецкая И.Д. (2023) Палеокриогенный генезис западного рельефа Оренбургской области. В сб.: Перигляциал Восточно-

Европейской равнины и Западной Сибири. Материалы Всероссийской научной конференции. Ростов Великий, 25–26 августа 2023 г. [Электронное издание]. М.: ИГ РАН. С. 116–122.

Теории и методы физики почв. (2007) Коллективная монография под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К. 616 с.

Трубецков Д.И. (2004) Введение в синергетику. Хаос и структуры. М.: Едиториал УРСС. 240 с.

Фридланд В.М. (1972) Структура почвенного покрова. М.: Мысль. 423 с.

Шеин Е.В., Иванов А.Л., Бутылкина М.А., Мазиров М.А. (2001) Пространственно-временная изменчивость агрофизических свойств комплекса серых лесных почв в условиях интенсивного сельскохозяйственного использования. *Почвоведение* **5**, 578–585.

Шеин Е.В., Трошина О.А. (2012) Физические свойства почв и моделирование гидротермического режима комплексного почвенного покрова Владимирского ополья. *Почвоведение* **10**, 1099–1108.

Arkhangelskaya T.A. (2014) Diversity of thermal conditions within the paleocryogenic soil complexes of the East European Plain: The discussion of key factors and mathematical modeling. *Geoderma* **213**, 608–616. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.001>.

Bing H., He P., Zhang Y. (2015) Cyclic freeze–thaw as a mechanism for water and salt migration in soil. *Environ Earth Sci.* **74**, 675–681. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4072-9>.

УДК 631.4

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ ОСТРОВА САХАЛИН В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Решоткин О.В.

ИФХиБПП РАН, Пущино, Российская Федерация
reshotkin@rambler.ru

SOIL TEMPERATURE REGIMES OF SAKHALIN ISLAND UNDER CONDITIONS OF
MODERN CLIMATE CHANGES

Reshotkin O.V.

IPBPSS RAS, Pushchino, Russian Federation

Annotation: The temperature regime of soils on Sakhalin Island has been studied. Trends of air and soil temperature, precipitation and snow cover for the period 1961-2020 were revealed. It is established that the modern period is characterized by soil warming and an increase in cold season precipitation and snow cover depth.

Введение

Температурный режим почвы – распределение температуры в почвенном профиле и непрерывные изменения этого распределения во времени – является важной характеристикой функционирования почв. Среди почвенных свойств и режимов температурный режим и режим влажности почв обладают наибольшей скоростью изменения под влиянием климата (Кудеяров и др., 2011). В этой связи особую актуальность приобретает исследование изменения температурного режима почв в условиях глобального потепления.

Территория России теплеет существенно быстрее, чем планета Земля в целом (Третий оценочный доклад, 2022). При этом в разных регионах России потепление происходит неравномерно и отличается по степени воздействия на окружающую среду. Одним из регионов, чувствительных к изменению климата является остров Сахалин, расположенный у восточного побережья Евразийского материка в переходной зоне от континента к Тихому океану. Большая протяженность территории Сахалина с севера на юг, сложный горный рельеф, различный термический режим омывающих его Охотского и Японского морей создают разнообразие климатических условий, растительности и почвенного покрова острова.

Цель настоящей работы – охарактеризовать основные параметры температурного режима почв острова Сахалин и выявить тенденции изменения почвенного и атмосферного климата в современный период.

Объекты и методы

Для изучения отклика температурного режима почв острова Сахалин на современные изменения климата нами использованы данные наблюдений за температурой воздуха, осадками, снежным покровом и температурой почвы на метеостанциях Александровск-Сахалинский и Тымовское, расположенных в центральной части Сахалина. Метеостанция Александровск-Сахалинский ($50^{\circ}54'$ с.ш., $142^{\circ}10'$ в.д., высота – 30 м) расположена на западе Сахалина, на ровном плато побережья Татарского пролива Японского моря, у подножия Западно-Сахалинских гор. Метеостанция Тымовское ($50^{\circ}44'$ с.ш., $142^{\circ}43'$ в.д., высота – 94 м) расположена в средней части межгорной Тымовской долины – северной части Тымь-Поронайской низменности, расположенной между Восточно-Сахалинскими и Западно-Сахалинскими горами. Согласно физико-географическому районированию район исследования относится к подзоне средней темнохвойной тайги (Атлас Сахалинской области, 1967). Зональным типом растительности являются темнохвойные елово-пихтовые леса.

Исследуемые почвы – дерново-поверхностно-глееватая суглинистая на двучленной породе (суглинок на гальке с песком) (Александровск-Сахалинский) и дерново-поверхностно-глееватая глинистая (Тымовское). Данные полугидроморфные почвы формируются в условиях периодического сезонного переувлажнения поверхностными водами.

Период 1961–1990 гг. взят в качестве климатической нормы (КН), относительно которой проанализировано изменение параметров атмосферного климата и температурного режима почв.

Результаты и обсуждение

Почвы Сахалина формируются в условиях умеренно-муссонного климата. Несмотря на близость расположения, климатические условия формирования двух исследуемых почв существенно отличаются, что связано с орографическими особенностями территории. Средняя годовая температура воздуха составляет 0.4°C в Александровске-Сахалинском и -1.8°C в Тымовском (климатическая норма 1961–1990 гг.). Климат Тымовского более континентальный, летом здесь теплее, а зимой холоднее, чем в Александровске-Сахалинском. Различия в температуре воздуха особенно выражены в холодный период года. Средняя температура самого холодного месяца – января составляет -17.8°C в Александровске-Сахалинском и -23.7°C в Тымовском. По данным многолетних, более чем вековых наблюдений на исследуемой территории отмечается существенный рост температуры воздуха (рис. 1). За период 1881–2023 гг. средняя годовая температура воздуха в Александровске-Сахалинском выросла на 1.4°C . Начиная с 1960–1970-х гг. наблюдается увеличение среднедесятилетних среднегодовых температур воздуха каждое последующее десятилетие до максимальных значений в 2011–2020 гг. За период 1961–2020 гг.

среднегодовая температура воздуха выросла на 1.6°C в Александровске-

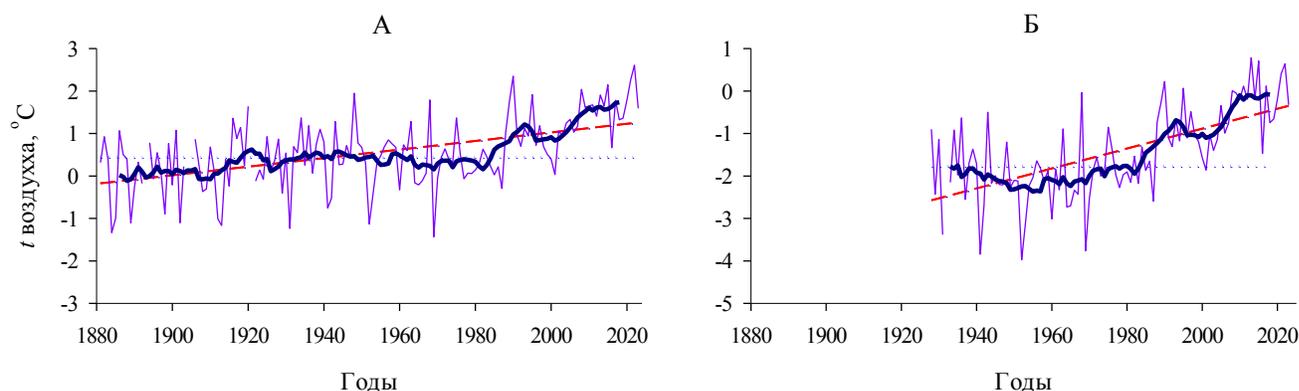


Рис. 1. Временные ряды среднегодовой температуры воздуха. А – Александровск-Сахалинский, Б – Тымовское (синей пунктирной линией показана климатическая норма 1961–1990 гг., жирной темно-синей линией показано 11-летнее скользящее среднее, красной пунктирной линией показана линия тренда)

Потепление наблюдается во все сезоны года, но особенно оно выражено в зимний и осенний сезоны. Средняя температура воздуха зимнего сезона в Александровске-Сахалинском и Тымовском увеличилась за период 1961–2020 гг. на 2.3 и 3.2°C, а средняя температура воздуха осеннего сезона увеличилась на 1.7 и 2.3°C соответственно. В весенний сезон температура воздуха в Александровске-Сахалинском и Тымовском выросла на 1.1 и 1.9°C, а в летний сезон на 1.2 и 1.6°C соответственно. Таким образом, в межгорной Тымовской долине во все сезоны года потепление выражено сильнее, чем на побережье Татарского пролива.

Повышение температуры воздуха сопровождается увеличением осадков. Исследуемая территория относится к зоне избыточного увлажнения, осадки превышают испарение и просачивание воды в почву. Избыточное увлажнение поверхностными атмосферными водами обуславливает глееватость почв. Климатическая норма годового количества осадков составляет 636 мм в Александровске-Сахалинском и 689 мм в Тымовском. За период 1961–2020 гг. в Александровске-Сахалинском годовое количество осадков увеличилось на 114 мм или на 18% от климатической нормы. В Тымовском за аналогичный период годовое количество осадков увеличилось на 96 мм или 14%. Рост осадков наблюдается почти исключительно в холодный период года, на который приходится 97% и 93% от суммы увеличения осадков в Александровске-Сахалинском и Тымовском соответственно.

Увеличение количества осадков в холодный период года ведет к увеличению мощности снежного покрова, которая значительно различается между

метеостанциями (рис. 2). Максимальной высоты снежный покров достигает в феврале-марте. В Александровске-Сахалинском высота снега в феврале и марте составляет 30 и 29 см, а в Тымовском – 79 и 86 см соответственно (КН 1961–1990 гг.). В связи с увеличением количества твердых осадков в холодный период года наблюдается тенденция увеличения высоты снежного покрова. За период 1961–2020 гг. высота снега увеличилась во все месяцы со снежным покровом кроме ноября в Александровске-Сахалинском и ноября и декабря в Тымовском. В марте высота снежного покрова за 60-летний период увеличилась на 25 см в Александровске-Сахалинском и на 10 см в Тымовском.

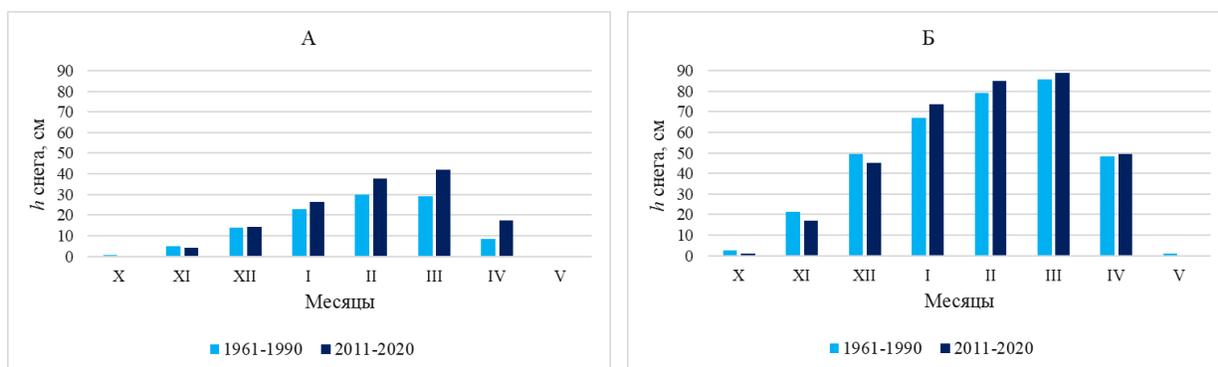


Рис. 2. Высота снежного покрова. А – Александровск-Сахалинский, Б – Тымовское

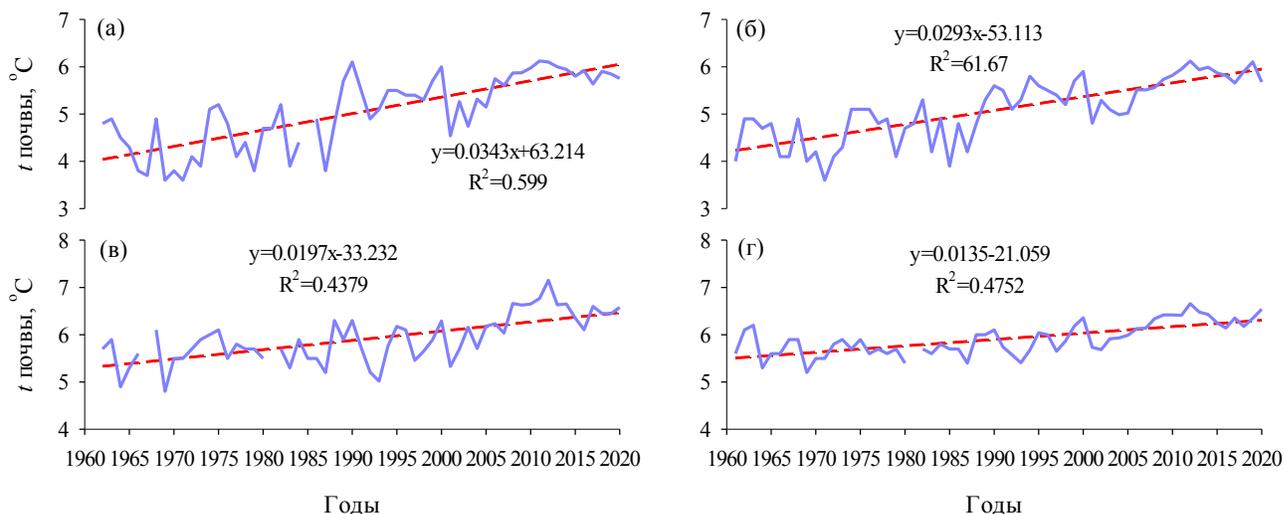


Рис. 3. Временные ряды среднегодовой температуры почв за период 1961–2020 гг. (а) – Александровск-Сахалинский, глубина 20 см, (б) – Александровск-Сахалинский, глубина 160 см, (в) – Тымовское, глубина 20 см, (г) – Тымовское, глубина 160 см

Средняя годовая температура почвы составляет в Александровске-Сахалинском 4.5°C на глубинах 20, 40 и 80 см, 4.6°C на глубине 160 см и 4.7°C на

глубине 320 см (климатическая норма 1961–1990 гг.). В Тымовском средняя годовая температура почвы одинаковая на всех глубинах и составляет 5.7°C. Тренды среднегодовой температуры обеих почв за период 1961–2020 гг. на всех глубинах положительные (рис. 3). Наиболее существенный рост среднегодовой температуры наблюдается в верхней части профиля почв на глубинах 20 и 40 см. На данных глубинах за 60-летний период температура почв увеличилась в Александровске-Сахалинском и Тымовском на 2.1 и 1.2°C соответственно. На глубине 80 см среднегодовая температура почв в Александровске-Сахалинском и Тымовском выросла на 1.9 и 1.1°C, на глубине 160 см – на 1.8 и 0.8°C, а на глубине 320 см – на 1.7 и 0.8°C соответственно.

Таким образом, более существенное (на 0.8–1.0°C) увеличение среднегодовой температуры почвы в Александровске-Сахалинском наблюдается на фоне более существенного (на 0.7°C) роста температуры воздуха в Тымовском. Линейной зависимости между ростом температуры исследуемых почв и увеличением температуры воздуха не существует. Это связано с двумя основными факторами – разным гранулометрическим составом почв и разной мощностью снежного покрова в зимний период. В отличие от суглинистой почвы в Александровске-Сахалинском, в Тымовском почва глинистая. Как известно, тяжелые глинистые почвы обладают большой влагоемкостью, они медленно прогреваются. Мощный снежный покров в Тымовском, высота которого почти в 3 раза больше, чем в Александровске-Сахалинском имеет теплоизолирующее свойство, сглаживающее реакцию температуры почвы на увеличение температуры воздуха в холодный период года. Снежный покров не только сдерживает выхолаживание и накопление холода в почве в период промерзания и нахождения почвы в мерзлом состоянии, но и сдерживает проникновение тепла в почву при протаивании.

Сопоставление средних многолетних значений температуры почв в 2011–2020 и 1961–1990 гг. показывает более значительное потепление почвы в Александровске-Сахалинском во все сезоны года, кроме летнего сезона. Летом на глубинах 20, 40 и 80 см почва в Тымовском потеплела на 0.4–0.8°C сильнее, чем в Александровске-Сахалинском. В зимний сезон почва в Александровске-Сахалинском более значительно потеплела в верхней части профиля, а в летний, наоборот, в нижней части профиля. В Тымовском более интенсивное потепление в летний сезон наблюдается в верхней части профиля, а в зимний сезон почва потеплела относительно равномерно.

Несмотря на более низкие температуры воздуха в холодный период года, из-за более мощного снежного покрова почва в Тымовском промерзает на значительно меньшую глубину (рис. 4). В 2011–2020 гг. глубина проникновения температуры 0°C в почву относительно периода 1961–1990 гг. уменьшилась в Александровске-Сахалинском на 69 см со 112 до 43 см, а в Тымовском с 22 до величины менее 20 см. Глубина проникновения температур выше 10°C в почву, наоборот, увеличилась в

Александровске-Сахалинском на 52 см со 159 до 211 см, а в Тымовском на 67 см со 185 до 252 см. Сумма температур почвы ниже 0°C на глубине 20 см уменьшилась в Александровске-Сахалинском с -366 до -89°C, а в Тымовском с -11 до -2°C. Сумма температур почвы выше 10°C увеличилась в Александровске-Сахалинском на 174°C с 1571 до 1745°C, а в Тымовском на 195°C с 1618 до 1813°C. Увеличение мощности почвенной толщи с активными температурами выше 10°C и уменьшение глубина проникновения температуры 0°C в почву свидетельствуют о потеплении исследуемых почв как в теплый, так и в холодный периоды года.

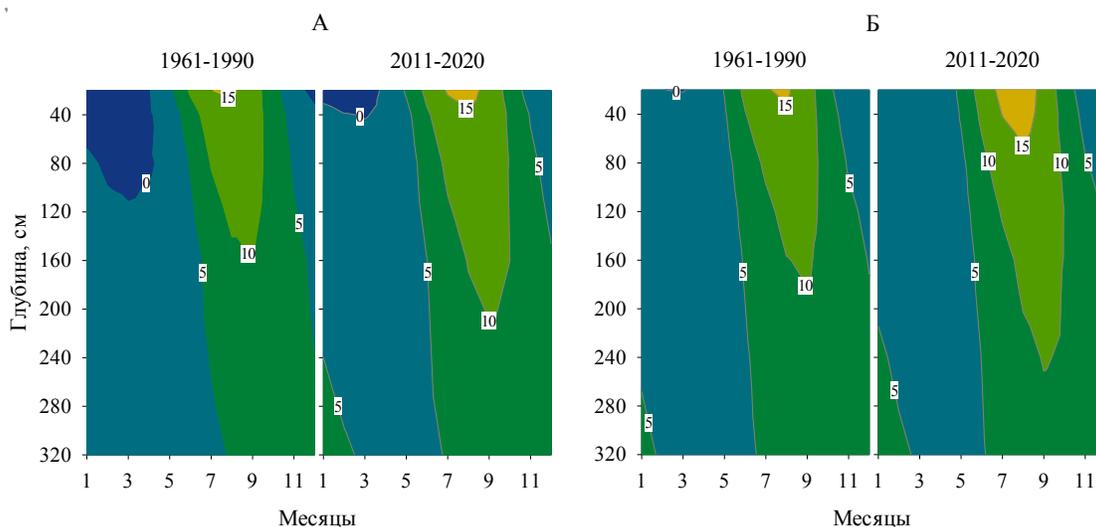


Рис. 4. Температура дерново-поверхностно-глееватых почв Сахалина (средняя за период 2011–2020 гг.) относительно климатической нормы (1961–1990 гг.). А – Александровск-Сахалинский (западное побережье), Б – Тымовское (межгорная долина)

Выводы

В современный период на территории Сахалина наблюдается увеличение температуры воздуха, сопровождающееся увеличением количества зимних осадков и высоты снежного покрова. Потепление ведет к изменению температурного режима почв. Наблюдается увеличение температуры почвы по всему почвенному профилю, увеличение продолжительности теплого периода в почве, уменьшение глубины проникновения температуры 0°C в почву. Отклик температурного режима почв Сахалина на увеличение температуры воздуха в значительной степени определяется высотой снежного покрова и гранулометрическим составом почв.

Благодарность

Работа выполнена по теме государственного задания № 122040500036–9 «Влияние климатических флуктуаций и антропогенной деятельности на эволюцию и современное состояние почв юга России».

Литература

Атлас Сахалинской области. М., 1967. 135 с.

Кудеяров В.Н., Демкин В.А., Гиличинский Д.А., Горячкин С.В., Рожков В.А. (2009)
Глобальное изменение климата и почвенный покров. *Почвоведение* **9**, 1027-1042.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории
Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание, 2022. 124 с.

УДК 631.4:631.417.1:631.95:631.17

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕКВЕСТРАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЧВ УПРАВЛЯЕМЫХ АГРОЭКОСИСТЕМ

Романенков В.А.^{1,2}, Мешалкина Ю.Л.¹, Горбачева А.Ю.¹, Добровольская В.А.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

romanenkov@soil.msu.ru

²ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, Москва, Российская Федерация

SEQUESTRATION POTENTIAL OF MANAGED AGROECOSYSTEMS SOILS
MODELING

Romanenkov V.A.^{1,2}, Meshalkina J.L.¹, Gorbacheva A.Yu.¹, Dobrovolskaya V.A.¹

¹Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

romanenkov@soil.msu.ru

²Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, Moscow, Russian Federation

Annotation: The RothC model was used to generate the maps within the FAO Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq) of the Russian croplands in the upper (0–30 cm) soil layer. Maps were refined using the available local and regional data.

Введение

Плодородие почв в значительной степени определяется углеродом, содержащимся в почвенном органическом веществе, поэтому его сохранение и восстановление имеют решающее значение для устойчивого развития. Также велика роль почвенного органического углерода в глобальных углеродных циклах. Он привлекает все большее внимание в качестве естественного поглотителя углерода, способного снижать выбросы CO₂ в атмосферу. Значительная часть углерода поглощается в виде углекислого газа растениями, а после их гибели и разложения оказывается в почве. Часть углерода вновь попадает обратно в атмосферу в виде газов, часть может удерживаться в почве в виде органических остатков.

Стратегия поглощения углерода, получившая название *технологии негативной эмиссии*, базируется на внедрении углеродсберегающих технологий (УТ) в управляемых экосистемах. К ним можно отнести: выращивание бобовых и сидеральных культур с глубокопроникающей корневой системой; мероприятия по предотвращению эрозии почв, переход к нулевой обработке почвы и прямому посеву; внедрение длинноротационных севооборотов с участием посевов многолетних трав; применение биологических средств защиты растений и биостимуляторов гумификации растительных остатков и т.п. (ИГКЭ, 2023).

Неполное понимание того, как влияют на запас органического почвенного углерода изменения климата, землепользования, технологий и эдафических

факторов, усложняет разработку платформ мониторинга, отчетности и проверки (MRV - monitor, report and verify; FAO, 2020). Большая пространственная изменчивость и медленные временные изменения запасов углерода в почвах, в том числе при смене элементов агротехнологий, происходящих климатических изменениях затрудняют обнаружение краткосрочных изменений, а также разработку надежных и простых в применении платформ (FAO, 2020).

В связи с этим динамические углеродные модели, ранее использовавшиеся главным образом для фундаментальных исследований, стали в настоящее время применяться в региональных и глобальных масштабах для целей инвентаризации почвенного углерода и парниковых газов в почве. Подобный подход позволяет обеспечить третий уровень отчетности (либо внедрение отдельных его элементов при втором уровне) анализа оценки изменений запасов углерода. Руководящих принципов национальных инвентаризаций парниковых газов Межгосударственной экспертной комиссии по изменению климата (IPCC, 2021). В этом русле лежит работы по созданию Национальной системы наблюдения и учета баланса углерода на сельскохозяйственных и лесохозяйственных землях России (Иванов и др., 2021). Использование моделей связано с их верификацией по данным наземных мониторинговых и полевых исследований, с использованием дистанционных данных и результатов длительных полевых опытов (Иванов и др., 2021; Harden et al., 2018; Paustian et al., 2019). Предполагается, что модели обеспечат количественную оценку изменений запасов углерода в почве и потоков парниковых газов в платформах MRV.

Программа создания Глобальной карты секвестрации почвенного углерода в верхнем 30 см слое пахотных почв (Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map – GSOCseq) рассматривается ФАО как проект, направленный на оценку потенциала секвестрации углерода почвами сельхозугодий путем создания надежных, прозрачных и экономически эффективных механизмов MRV изменений в запасах почвенного органического углерода (ФАО, 2022).

Задачей данного исследования было создание на основе Ротамстедской углеродной модели RothC Глобальной карты секвестрации почвенного углерода в слое верхнем 30 см слое пахотных почв России по методике ФАО, а затем её уточнение с привлечением доступного объема локальных и региональных данных о пахотных почвах на примере Ростовской области.

Объекты и методы

Источниками входных данных, использованных при параметризации модели, являлись агроклиматические данные БД Climatic Research Unit (CRU) TS v4.05, 1901-2020, доступные по полуградусной регулярной сетке: среднемесячная температура воздуха, среднемесячное количество осадков, среднемесячная потенциальная эвапотранспирация по Пенману–Монтейту. Почвенные данные были взяты из двух

источников. Запасы органического углерода почвы на глубине 0 – 30 см – из БД Национальная карта запасов почвенного органического углерода (Чернова и др., 2021), а содержание фракции ила (частиц < 0,002 мм) – из карты почвенных свойств SoilGrids250m версия 2.0. Для расчёта использовались продукты со спутника MODIS MOD13A1.006 Terra Vegetation Indices 2018 – 2020 гг., на основании которых оценивалась чистая первичная продукция (NPP) по данным температуры, осадков и длительности вегетации. Уточнение результатов моделирования было проведено на основе доступных данных сельскохозяйственной статистики Росстата по муниципальным районам. Тестовой областью для уточнения прогноза секвестрации определена Ростовская область. Ее территория охватывает, в основном, степную зону обыкновенных и южных черноземов и сухостепную зону темно-каштановых и каштановых почв. За основу расчетов были взяты уравнения регрессии для определения массы растительных остатков по урожаю основной продукции, разработанные отечественными исследователями (Левин, 1977). Из базы данных показателей муниципальных образований Росстата (2024) были использованы массивы о посевных площадях сельскохозяйственных культур, а также урожайности в расчете на убранную площадь. По этим данным была оценена биомасса подземной и надземной части растений, из которой вычислялось поступление C, принимая его содержание 45% в абсолютно-сухой массе.

Расчёты проведены на основе специально созданной в ходе данной работы актуальной маски пахотных земель России, соответствующей 2020 г. (Кренке, 2020). Подробно методика параметризации изложена в публикациях Романенков и др. (Романенков и др., 2023; Romanenkov et al., 2024).

Согласно методике ФАО, моделирование проводилось для четырех возможных сценариев на период с 2020 г. по 2040 г. Они отличались количеством поступающего органического вещества в почву. Первый сценарий – BAU (Business as usual) – предполагал, что поступление органического вещества, рассчитанное исходя из климатических и спутниковых данных, остается неизменным на весь период моделирования, т.е. подразумевалось сохранение текущих технологий возделывания земель. В трех других сценариях предполагалось внедрение УТ SSM1, SSM2, SSM3 (Soil Sustainable Management – рационального использования почвенных ресурсов) количество органического вещества увеличивалось на 5, 10 и 20%, соответственно. Считается, что применение УТ возделывания сказывается на показателе чистой первичной продукции (NPP), увеличивая его в заданной выше пропорции.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты потенциальной возможности секвестрации углерода пахотными почвами с пространственным разрешением 1 км в 2020–2040 гг. при внедрении УТ (сценарии SSM1-3), показывают, что их при применении в течение 20 лет суммарно потенциальную скорость секвестрации пахотными почвами РФ в

слое 0 – 30 см можно оценить в размере 17 Мт/год. Показано, что в ряде субъектов РФ: Краснодарский край, Республика Крым, Приморский край, Республика Адыгея и Калининградская область должны быть приняты меры по внедрению практики устойчивого управления почвенными ресурсами. Ожидаемая суммарная секвестрация обеспечивает России 5 место в ряду стран максимального потенциала глобальной секвестрации органического углерода почвами сельхозугодий.

Абсолютные величины секвестрации для каждой зоны почвенно-экологического районирования, за исключением зоны светло-каштановых и бурых почв полупустыни, где она практически не отличается от нуля, в национальном масштабе положительны и составляют 20-70 кг С/год при неизменном хозяйствовании (сценарий BAU). Наиболее перспективной для секвестрации углерода территорией, на которой целесообразно планировать увеличивать поступление углерода растительных остатков в почву при реализации стратегии секвестрации, является зона лесостепи, где возможно обеспечение устойчивого накопления углерода в двадцатилетний период. При этом для природно-климатической зоны серых лесных почв лиственных лесов достичь скорости накопления органического углерода в 2 промилле возможно при внедрении УТ, обеспечивающих дополнительное поступление 10% углерода с растительными остатками, а для зоны оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи – с УТ при дополнительном поступлении 20% углерода (табл. 1). Увеличение поступления углерода на 5% при внедрении УТ может обусловить рост секвестрации углерода с 70 до 100-120 кг С/год, а на 20% – до 180-250 кг С/год, что соответствует потенциалу секвестрации органического углерода для пахотных почв климатических зон умеренно-влажного континентального климата Глобальной карты секвестрации почвенного углерода. За 20 лет запас почвенного углерода возрастает в среднем на 600 кг С/га для УТ при дополнительном поступлении 5% углерода с растительными остатками и 2500 кг С/га – при дополнительном поступлении 20%.

Южнее, в зоне распространения обыкновенных и южных черноземов степи, можно ожидать поддержания текущих запасов углерода при условии сохранения современного уровня продуктивности агроценозов до 2040 г. Общей закономерностью для агрочернозёмов, где поступление углерода при неизменном хозяйствовании оказывается недостаточным для поддержания текущих запасов углерода, является низкий потенциал секвестрации. При внедрении УТ этом наблюдаются следующие тенденции: период накопления ограничен 2040 г, с выходом на равновесный уровень в зависимости от начальных запасов углерода почвы, а также потеря ранее накопленных запасов после 2060-80 гг.

Модификация севооборотов даёт возможность дополнительной секвестрации до достижения состояния насыщения спустя несколько лет по сравнению с исходными севооборотами, что позволяет использовать преимущества

климатических изменений, но скорость накопления в 2040-2060 гг. ограничивается 1-2 промилле при запасах органического углерода почвы 60-80 т/га. Как показывают более детальные исследования, основанные на наземных данных Росстата и длительных полевых опытах в Ростовской области, в реальности для большого количества контуров, при ежегодном варьировании поступления углерода на 0,5-1,5 т/га по сравнению с оценками на основе дистанционного зондирования, удастся обеспечить поддержание исходных запасов углерода либо слабый его прирост, даже при реализации УТ, обеспечивающих 5% рост поступления углерода.

Таблица 1. Абсолютная скорость секвестрации углерода почвами (кг С/га в год) для различных сценариев землепользования

Зона почвенно-географического районирования	Сценарии			
	BAU	SSM1	SSM2	SSM3
Дерново-подзолистых почв южной тайги	44	69	84	116
Серых лесных почв лиственных лесов	68	97	124	177
Оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи	68	117	160	247
Обыкновенных и южных черноземов степи	24	57	92	170
Темно-каштановых и каштановых почв сухой степи	18	48	78	136
Буроземов и подзолисто-буроземных почв хвойно-широколиственных и широколиственных лесов	37	46	98	194
Светло-каштановых и бурых почв полупустыни	-2	42	73	139

Использование при моделировании NPP данных Росстата и Агрохимслужбы позволило получить более точные оценки скорости секвестрации почвенного углерода пахотными почвами Ростовской области (рис. 1). Основные отличия наблюдаются в зоне южных черноземов, где отмечается значительное увеличение скорости секвестрации, а в зоне обыкновенных черноземов – небольшое снижение. В целом для сценария BAU произошел сдвиг в сторону положительных значений и оно составляет 32 кг С га/год. При применении УТ накопление углерода происходит со средней скоростью 63; 96; 161 кг С га/год для SMM1, SSM2 и SSM3, соответственно (рис. 2). Таким образом, по уточненным оценкам Ростовская область входит в число регионов с наибольшим приростом объемов секвестрации при условии выполнения сценариев реализации технологий устойчивого управления почвенными ресурсами, который может быть оценен в 475-1244 Кт в год.

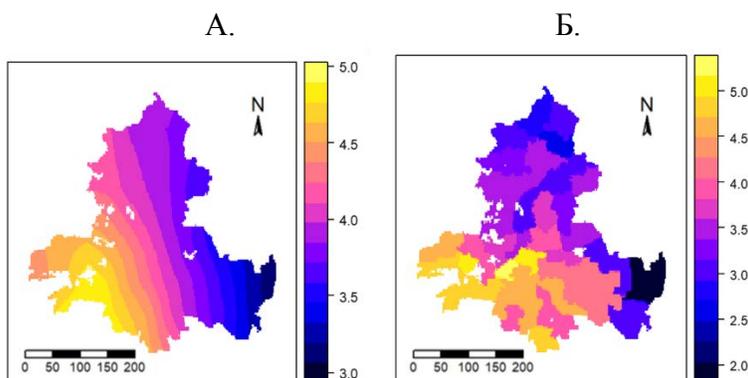


Рис. 1. Чистая первичная продукция (NPP), т С га/год. А – результаты расчетов по традиционной методике, Б – результаты расчетов по локальным данным

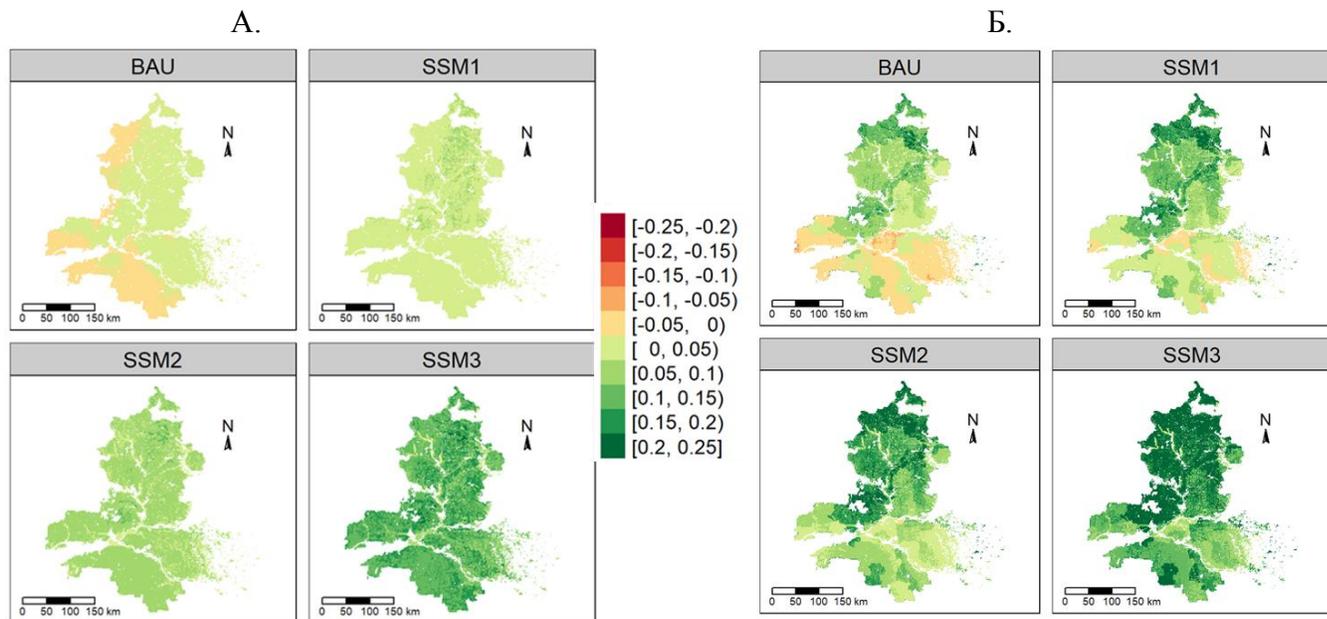


Рис. 2. Абсолютные показатели скорости секвестрации почвенного углерода Ростовской области, т С га/год, для сценария неизменного хозяйствования (BAU) и для трех сценариев реализации стратегий применения углерод сберегающих практик (SSM 1-3), А – результаты расчетов по традиционной методике, Б – результаты расчетов по локальным данным

Выводы

Результаты моделирования по Ростовской области показали, что использование локальных данных по урожайности сельскохозяйственных культур для расчета поступающего в почву органического вещества показывает больший потенциал секвестрации углерода по сравнению с оценками, основанными на дистанционном

зондировании, что особенно заметно для территории распространения южных чернозёмов.

Использование комплекса показателей - ожидаемых относительных среднегодовых изменений запасов углерода почвы, абсолютных запасов углерода, ежегодного поступления углерода с растительной биомассой и органическими удобрениями, скорости достижения нового равновесного состояния запасов углерода в условиях будущего климата даёт возможность оценивать эффективность внедрения УТ и адаптационных решений, учитывающих климатические изменения.

Благодарность

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Литература

- Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н. (2021) Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева* **108**, 175-218. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>
- ИГКЭ (2023) Методология реализации климатического проекта № 0003. Изменение запасов органического углерода в почве на пахотных землях. 24 с. https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20№0003_rus_2.0.pdf.
- Кренке А. Н. (2020) Выявление инвариантных состояний агроландшафтов на основе иерархического факторного анализа дистанционной информации. *Принципы экологии* **3**, 16—27.
- Левин Ф.И. (1977) Количество растительных остатков в почвах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции. *Агрoхимия* **8**, 36—43.
- Романенков В.А., Мешалкина Ю.Л., Горбачева А.Ю., Добровольская В.А., Кренке А.Н. (2023) Прогноз динамики запасов углерода в почвах возделываемых земель Европейской России в контексте стратегии низкоуглеродного развития. *Известия РАН. Серия географическая* **87: 4**, с. 584-596 <https://doi.org/10.31857/S2587556623040106>
- Росстат (2024) База данных показателей муниципальных образований. <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Munst.htm>

- Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепаченко Д.Г. (2021) Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России. *Почвоведение* **3**, 273–286. <https://doi.org/10.31857/S0032180X210300>
- FAO (2020) A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb0509en>.
- Harden J. W., Hugelius G., Ahlstrom A. et al. (2018) Networking our science to characterize the state, vulnerabilities, and management opportunities of soil organic matter. *Glob. Change Biol.* **24**, e705–e718. <https://doi.org/10.1111/gcb.13896>.
- Paustian K., Collier S., Baldock J., Burgess R., Creque J. et al. (2019) Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system *Carbon Management*, **10**, **6**, 567–587. <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1633231>
- Romanenkov V.A., Meshalkina J.L., Gorbacheva A.Yu, Krenke A.N., Petrov I.K., Golozubov O.M., Rukhovich D.I. (2024) Maps of Soil Organic Carbon Sequestration Potential in the Russian Croplands. *Eurasian Soil Science* **57**: **5(5)**, 737-750 DOI 10.1134/S106422932360375X

УДК 631.43

ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ЯРОСЛАВСКОГО ПОВОЛЖЬЯ

Русаков А.В., Попов А.И.

Кафедра почвоведения и экологии почв, Институт наук о Земле,
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская
Федерация
spp-06@mail.ru

TRENDS IN CHANGES IN THE STRUCTURAL STATE AND SOME PROPERTIES
OF SOILS OF DIFFERENT AGE-ABONDED LANDS OF THE YAROSLAVL VOLGA
REGION

Rusakov A.V., Popov A.I.
Department of Soil Science and Soil Ecology, Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State
University,
Saint Petersburg, Russia

Annotation: It was shown that abandoned soils had significantly improved structurally and in their basic qualities; these processes are especially noticeable in sandy soils. In loamy soils, monitoring investigations in the row of abandoned arable land revealed an improvement in their agrophysical and a number of physic-chemical and chemical properties.

Введение

Анализ агресурсного потенциала залежных почв Нечерноземья предполагает, прежде всего, выявление тренда их изменений в морфологии и свойствах за период постагрогенеза, а также по возможности исходную характеристику бывших агропочв, что важно в контексте оценки земельных ресурсов конкретного региона. Актуальность исследований в этом ключе обусловлена тем, что разработанная МСХ РФ «Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации» на 2021–2030 гг. предполагает возвращение 12 млн га из 44 млн га всех неиспользуемых земель РФ. По усредненным данным (Кундиус, Воронкова, 2015) в настоящее время в каждом субъекте РФ не распахивается и не используется в сельскохозяйственном производстве примерно 28,5% площади пахотных угодий.

Известно, что структура почвы во многом определяет ее агрофизические свойства, отвечает за водный, тепловой и питательный режимы, газообмен и др.

Поэтому оценка микроагрегатного состава почвы при переводе ее из пашни в залежь приобретают особое значение, поскольку позволяет количественно оценить тренды и степень изменения структурного состояния почв. Однако изучению агрофизических свойств залежных почв, в том числе их агрегатного состояния, не уделяется должного внимания (Афонченко и др., 2015; Баева и др., 2017; Замотаев и др., 2016; Леднев, Дмитриев, 2015, и др.).

Цель данной работы: выявить тренды эволюционных изменений агрегатного состояния и некоторых базовых свойств агропочв при переводе их в залежное состояние. Задачи исследования: 1) оценка характера и степени изменения свойств в пределах постагрогенной толщи (сравнение верхнего и нижнего слоев); 2) выявление тренда и направленности трансформации свойств почв после снятия антропогенной нагрузки в ряду пашня-залежь.

Объекты и методы

Объекты исследования

Для выявления трендов изменений в пахотных почвах после снятия с них антропогенной нагрузки использовались хроноряды почв, основанных на двух сроках наблюдений. Первый из них относится к 1990 г. (заложение разрезов пахотных почв), а второй – к повторному заложению на этом же месте сети почвенных разрезов на разновозрастных залежах. В качестве пахотных почв реперные разрезы, отправная точка мониторинга) использовались только автоморфные почвы, классифицированные по «Классификации и диагностике почв СССР» (1977) как освоенные, окультуренные и культурные дерново-подзолистые и серые лесные почвы. В качестве объектов исследования послужили архивные образцы агропочв, отобранные при крупномасштабном (М 1:10000) почвенном картографировании землепользований хозяйств в течение 1986–1990 гг. (IV тур оценки земель) в Пошехонском, Брейтовском, Угличском, Ростовском и Переславском районах Ярославской области.

Исследованные почвы сформированы на однородных и двучленных почвообразующих породах четвертичного возраста, которые различаются по гранулометрическому составу (от песков до суглинков, доминируют супесчаные и легкосуглинистые разности). В обработку были включены 35 разрезов почв залежей и 32 пары мониторинговых разрезов (пашня-залежь). Все почвы, как современного, так и первого этапа мониторинга, классифицировались нами в соответствии с КиДПР (Шишов и др., 2004).

Методы исследований

Достаточно точная привязка почвенных разрезов к постоянным объектам на местности и на почвенных картах во время картографирования 1986–1990 гг. определила высокое пространственное разрешение, необходимое для тренда

изменений свойств почв в их постагрогенный период. Этому же способствовала обработка архивных почвенно-картографических материалов в ГИС-программах (пакеты ArcGIS 10.2 и QGIS 3.8.1) с привязкой на основе подложки из космических снимков высокого разрешения; такая обработка позволила с высокой точностью определить места закладки почвенных разрезов современного этапа мониторинга (2019–2021 гг.).

Образцы почв хронорядов пашня-залежь подверглись единовременной аналитической обработке попарно по единым общепринятым методикам (Аринушкина, 1970; Растворова, 1983). Для оценки структурного состояния почв (для интерпретации данных двух сопряженных анализов – микроагрегатного и гранулометрического) использовали показатель степени агрегированности по Бейверу (K_b) (Baver, 1956). Ранее нами было показано (Русаков и др., 2022), что этот параметр наиболее информативно отразил степень и направленность трансформации микроструктурного состояния почв в ряду пашня-залежь. Удельная поверхность определялась расчетным способом на основе содержания гумуса и фракции физической глины (Сапожников, Шевченко 1989). Для определения возраста залежи на пробных площадках размером 20×20 м с центром на опорном разрезе почвы описана растительность (Ипатов, Мирин, 2008); в пределах однородного по растительности контура внутри пробной площади пробурены визуально самые старшие деревья, по годичным кольцам определен их возраст. В случае отсутствия взрослых деревьев и наличия подроста максимальный возраст присутствующих древесных растений установлен путем подсчета годичных приростов на побеге.

Результаты и обсуждение

Все изученные почвы разновозрастных залежей и их реперные (пахотные) аналоги были объединены в две группы. Первая включала в себя супесчаные разности – почвы, имеющие легкий гранулометрический состав и сформированные на супесчано-песчаных однородных и двучленных отложениях. Вторая группа включала почвы суглинистого (в основном легкосуглинистого) гранулометрического состава как на однородных суглинисто-глинистых, так и на двучленных породах различного генезиса. Необходимость разделения объектов исследования на две группы, по нашему мнению, обусловлена тем обстоятельством, что в организации структуры (особенно микроагрегатов) основная связующая роль между пылеватыми и песчаными частицами отводится илистым частицам. Это определяет устойчивость и стабильность агрегатов, а также позволит определить характер и тренды постагрогенной трансформации почв после снятия антропогенной нагрузки.

Как нами было установлено, почти у половины залежных **супесчаных** почв на месте относительно однородного пахотного горизонта уже через 20–25 лет диагностирован вновь образованный серогумусовый горизонт АУ мощностью 8–10

см. В нижней части почв залежей находились постагрогенные горизонты P_{ra} мощностью 17–30 см; во всех случаях (даже у молодых залежей) исходная пахотная толща дифференцирована на два, реже — на три горизонта; у трети исследованных профилей диагностированы морфологические признаки оглеения.

На рис. 1 приведены результаты парных значений отношения сравниваемых величин разновозрастных почв для нижней части постагрогенной толщи (принято за единицу, или «низ») по сравнению с верхними слоям или горизонтам («верх»).

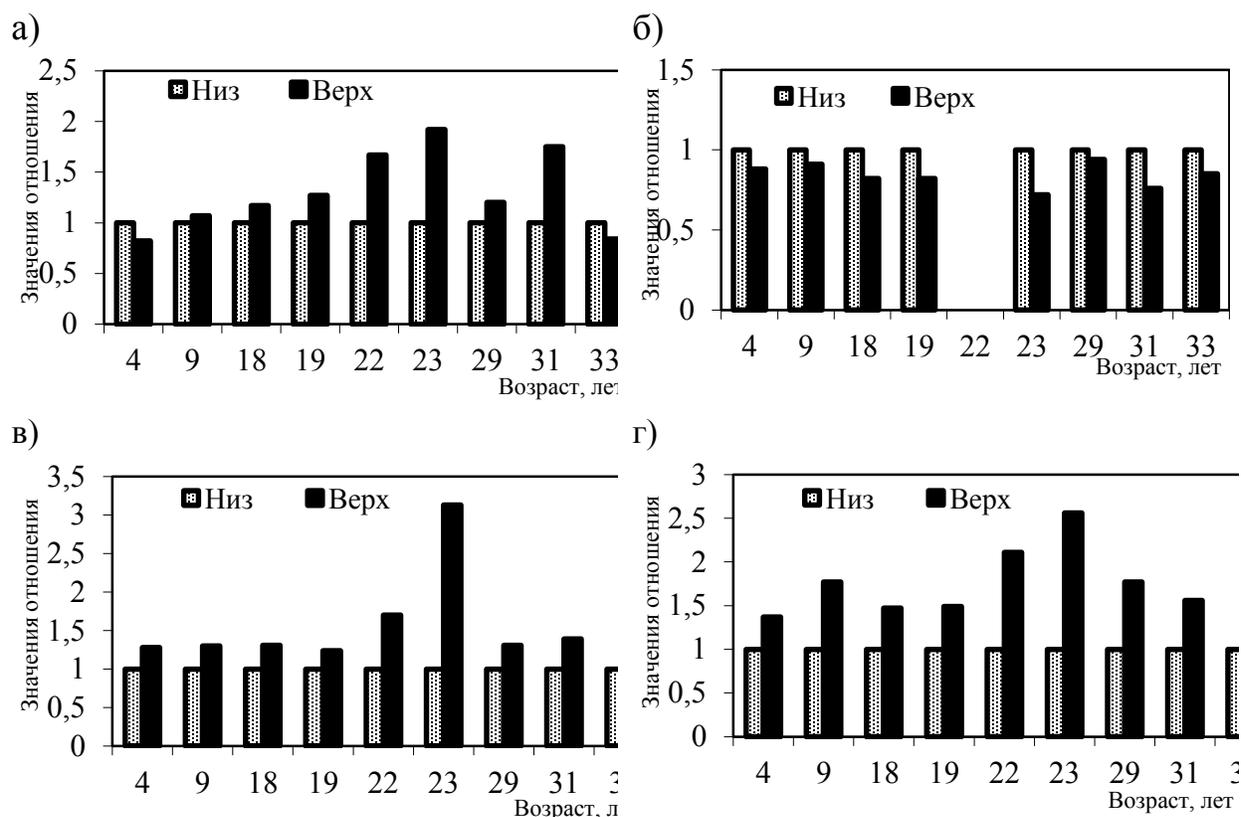


Рис. 1. Отношения парных значений сравниваемых величин разновозрастных супесчаных почв для нижней части постагрогенной толщи (принято за единицу, или «Низ») по сравнению с верхними слоям или горизонтам («Верх»). а) – степень агрегированности по Бейверу (K_b); б) – плотность сложения (D) $г/см^3$; в) – удельная поверхность, $м^2/г$; г) содержание гумуса, %.

Для супесчаных почв при сравнении нижнего слоя постагрогенной пахотной толщи с верхней выяснилось (рис. 1а), что практически в подавляющем числе случаев верхний слой оказался лучше агрегирован: намечается явная тенденция увеличения показателя K_b с увеличением срока залежности. Во всех случаях улучшение структурного состояния сопровождалось увеличением общей

порозности, что диагностировалось по заметному уменьшению плотности сложения в верхней части постагрогенной толщи (рис. 1б). Улучшение агрегированности в верхней части постагрогенного слоя закономерно сопровождалось увеличением здесь величинами удельной поверхности (рис. 1в), при этом срок перевода пашни в залежь в этом случае не имеет решающего значения. Во всех исследованных разрезах залежных почв содержание гумуса в верхних АУра, Ppa горизонтах залежей заметно прогумусирована по сравнению с нижними слоями бывших пахотных горизонтов, намечается тренд увеличения содержания гумуса в почвах более зрелых залежей (рис. 1г).

При сравнении свойств исходных пахотных почв с постагрогенными (при этом свойства в прогумусированной толще залежных почв рассчитывались как усредненные на мощность исходного пахотного горизонта) во всех случаях (за исключением одного разреза) выявлено увеличением величин степени агрегированности в почвах залежей по сравнению с пахотными аналогами (рис. 2а); выявлен заметный тренд увеличения структурного состояния в более зрелых залежах. За исключением 22% случаев, в постагрогенной залежи увеличены значения удельной поверхности по сравнению с исходным пахотным горизонтом агропочв (рис. 2б). В шести сравниваемых хоронорядах пашня-залежь из девяти, установлено увеличение содержания гумуса в постагрогенных горизонтах залежей; при этом срок перевода пашни в залежь не играет особой роли (рис. 2в). В отношении изменения величины потенциальной кислотности (конечно, учитывая при этом сильную сенсорность этого показателя к изменению окружающей обстановки), тем не менее, не выявлено однозначного изменения этого показателя в хроноряду пашня-залежь (рис. 2г).

Исследованиями установлено, что в ряде случаев у *суглинистых* почв на месте бывшего пахотного горизонта через 27–30 лет (что несколько позже по сравнению с супесчаными почвами) диагностирован вновь образованный серогумусовый горизонт АУ (реже – горизонт АУ) мощностью 5–10 см. В нижней части почв залежей на месте пахотного горизонта – постагрогенные горизонты Ppa мощностью 5–20 см. Во всех случаях исходная пахотная толща была дифференцирована на два, реже – на три горизонта, включая молодые залежи. У 17-ти % исследованных профилей диагностированы морфологические признаки оглеения, в основном в нижних слоях бывшей пахотной толщи.

Для *суглинистых* почв разновозрастных залежей в 72% случаев установлено увеличение степени агрегированности по Бейверу в верхней части постагрогенной толщи по сравнению с нижней (рис. 3а), при этом примерно в половине разрезов эта разница заметна и составляет 1,5–2,5 раза. Улучшение структурного состояния в верхних слоях почв под залежами сопровождалось заметным уменьшением плотности сложения в верхних слоях по сравнению с нижней толщей, что было установлено для всех исследованных разрезов (рис. 3б). За исключением двух

разрезов из двадцати, то есть в подавляющих случаях, выявленные выше тенденции улучшения степени агрегированности в верхних слоях постагрогенной толщи, диагностировалось также и по увеличению в них величин удельной поверхности (рис. 3в).

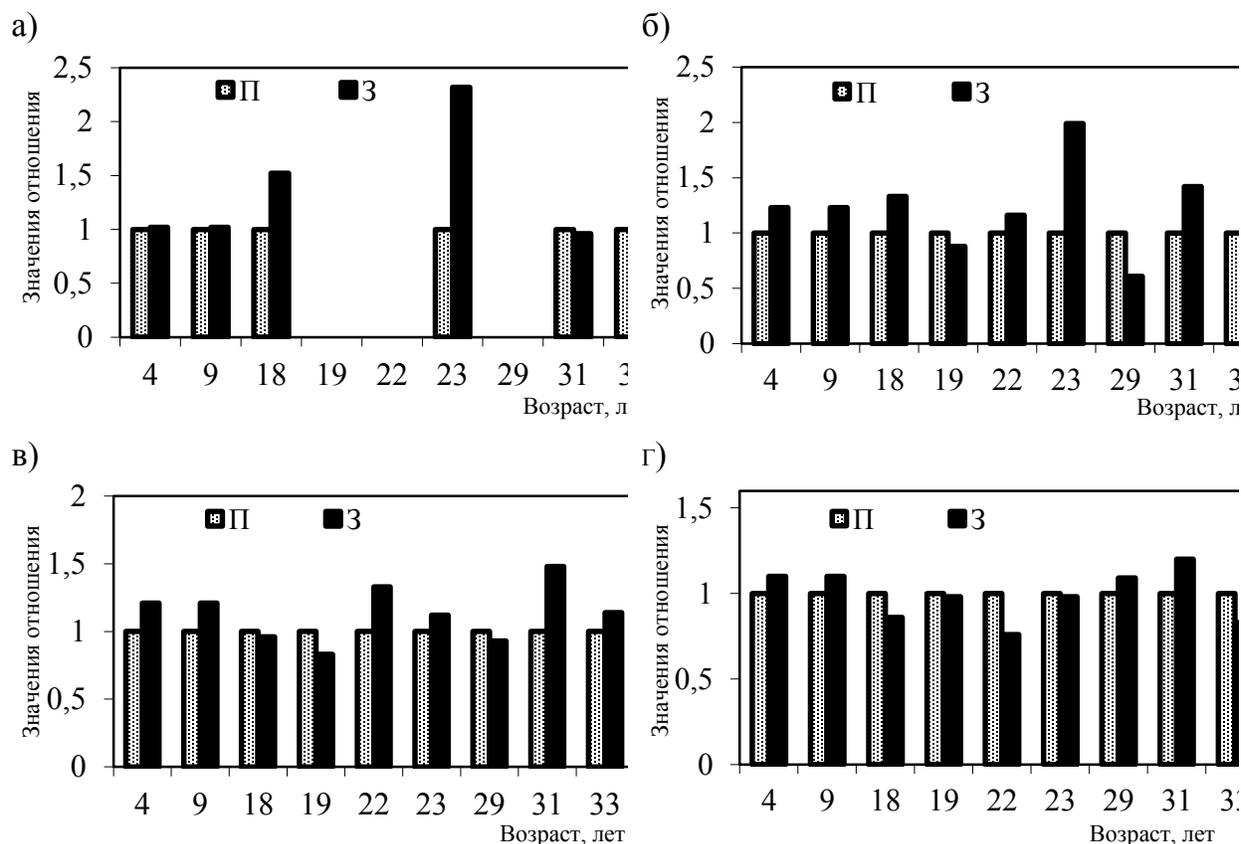
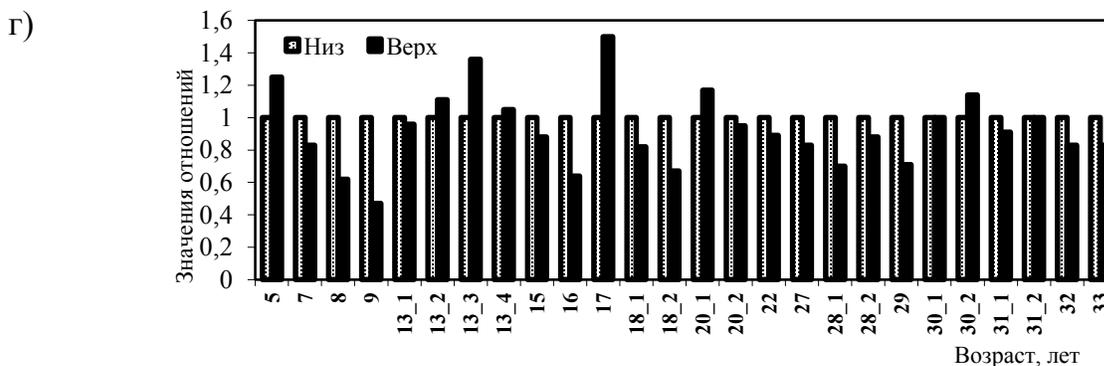
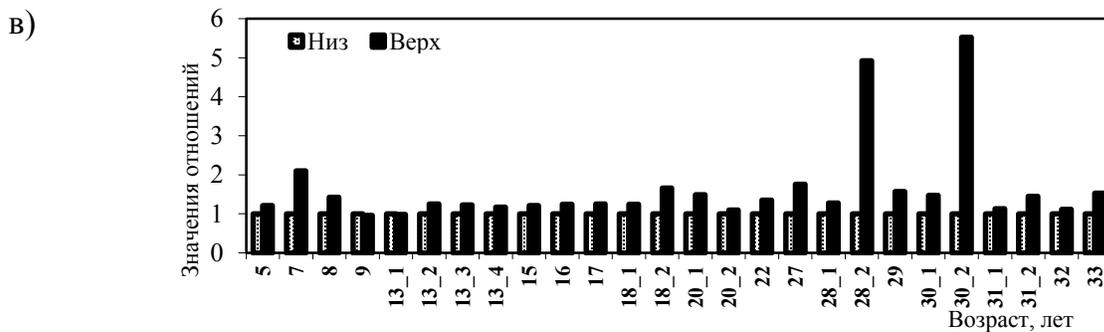
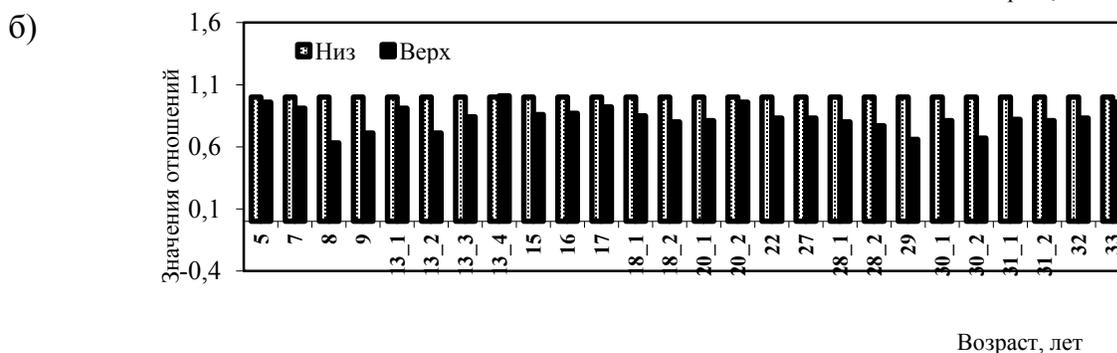
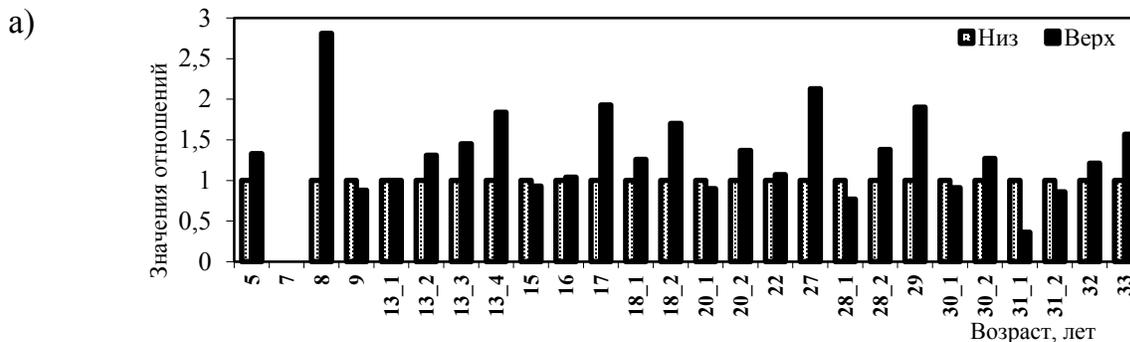


Рис. 2. Отношения парных значений сравниваемых величин супесчаных пахотных почв (II, принято за единицу) и разновозрастных залежных почв (III). а) – степень агрегированности по Бейверу (Kb); б) – удельная поверхность, м²/г; в) – содержание гумуса, %; г) – потенциальная кислотность, pH_{KCl}.

Весьма показательной и информативной тенденцией в ходе сравнения верхней и нижней слоев (горизонтов) толщи суглинистых залежных почв явилось в 68-ми % случаев заметное обезыливание верхней части постагрогенной толщи (рис. 3г). Таким образом, в результате этого «природного эксперимента» можно считать установленный факт устойчивого тренда выщелачивания (лессиваж?) ила при возвращении пахотной почвы в естественный ценоз в условиях гумидного климата южно-таежной подзоны ЕТР. Для всех изученных почв выявлено превышение содержания гумуса в верхних слоях залежной толщи по сравнению с нижними слоями (рис. 3д); это проявляется уже самых молодых залежей 5–7-летнего возраста. Отмечается заметный тренд обогащенностью гумусом верхних слоев

постагrogenной толщи по сравнению с нижними, начиная с залежей возрастом 18–20 лет.



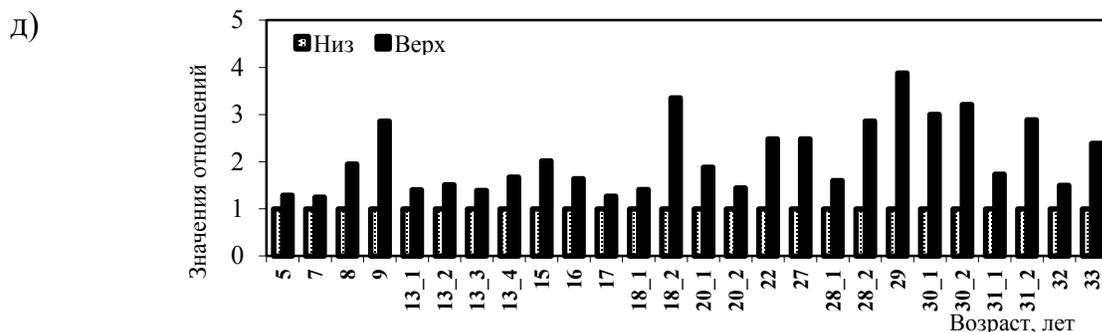


Рис. 3. Отношения парных значений сравниваемых величин разновозрастных суглинистых почв для нижней части постагрогенной толщи (принято за единицу, или «Низ») по сравнению с верхними слоями или горизонтами («Верх»). а) – степень агрегированности по Бейверу (K_b); б) – плотность сложения (D) г/см³; в) – удельная поверхность, м²/г; г) – содержание илистой фракции, %; д) содержание гумуса, %.

Сравнение исходных пахотных почв с залежными, функционирующими на месте агропочв при снятии антропогенной нагрузки, показало устойчивый тренд улучшения агрегированности постагрогенной толщи у 77-ти % исследованных разрезов сравниваемых пар (рис. 4а). Подобные закономерности, но в меньшей степени, выявлены при сравнении хронорядов пашня-залежь в отношении удельной поверхности: у 14-ти разрезов постагрогенных почв этот показатель оказался выше (рис. 4б), причем начиная с залежей возрастом 22 года и выше – величины удельной поверхности практически у всех почв оказались выше таковых по сравнению с пахотными аналогами. При сравнении пахотных и залежных почв в отношении содержания гумуса не выявило тенденций изменения его содержания (лишь у 52% залежных почв обогатенность гумусом постагрогенной толщи оказалась выше), но у залежей с возрастом 20–33 лет практически во всех случаях было установлено повышенное содержание гумуса по сравнению с пахотными аналогами (рис. 4с). В отношении изменения потенциальной кислотности – только у 47-ми % залежных почв увеличилась величина pH_{KCl} , что, очевидно, обязано прекращению известкования пахотных почв (рис. 4д).

Выводы

1. Для супесчаных почв, находящихся под залежами, выявлено существенное улучшение структурного состояния почв в верхних слоях постагрогенной толщи по сравнению с нижними слоями, которое сопровождается увеличением площади удельной поверхности и обогатенностью содержанием гумуса; выявленные закономерности указывают на преобладание проградационных процессов при переводе пашни в залежное состояние, которые усиливаются в более возрастных залежах. Мониторинговые исследования в ряду пашня-залежь также показали в

основном улучшение агрофизических свойств в процессе постагрогенной трансформации пахотных почв.

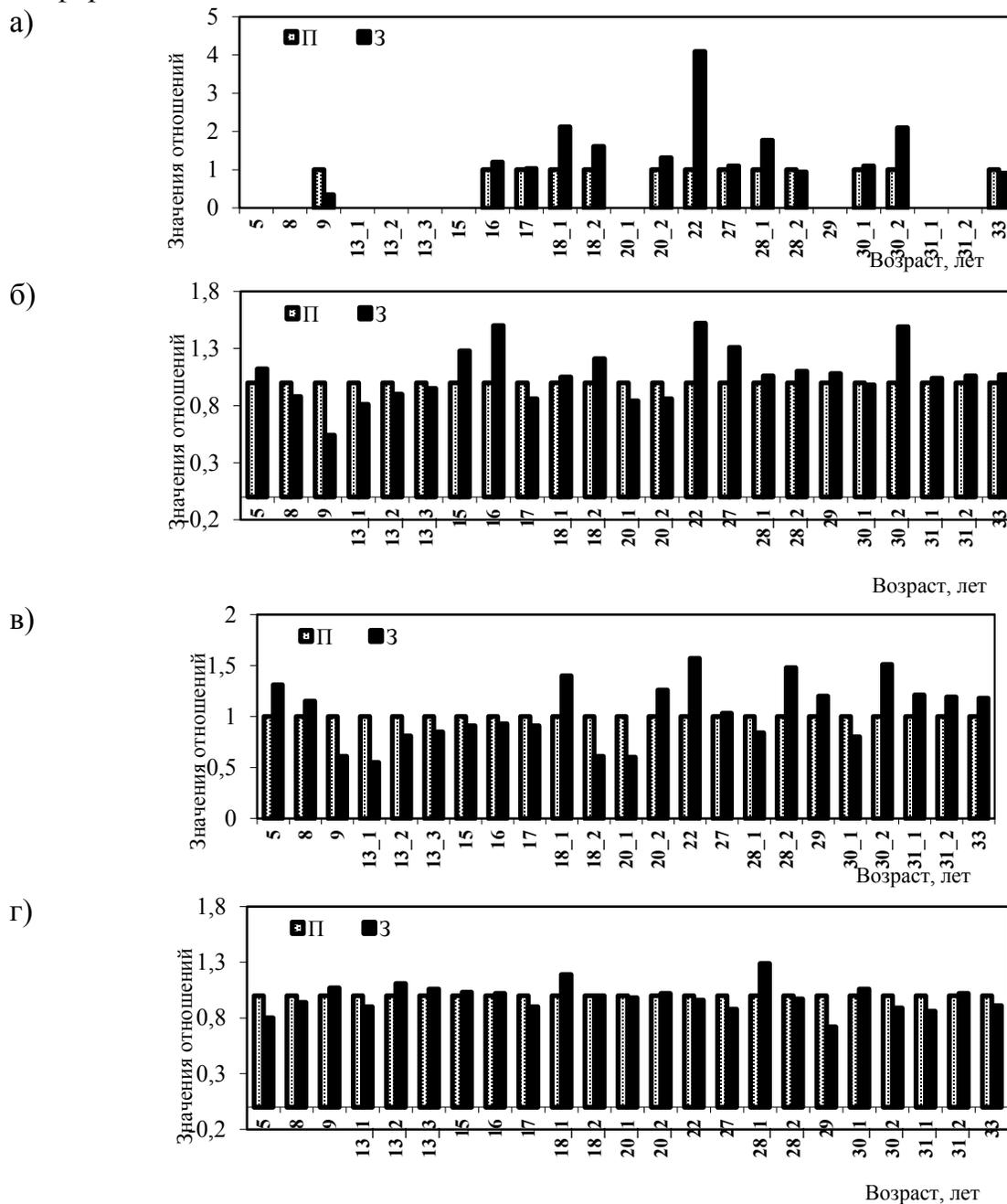


Рис. 4. Отношения парных значений сравниваемых величин суглинистых пахотных почв (П, принято за единицу) и разновозрастных залежных почв (3). а) – степень агрегированности по Бейверу (K_b); б) – удельная поверхность, m^2/g ; в) – содержание гумуса, %; г) – потенциальная кислотность, pH_{KCl} .

2. Тренд изменения постагрогенных суглинистых почв, как и в случае с супесчаными разностями, проявился в вертикальной изменчивости (анизотропии) изученных свойств в пределах залежной толщи. По сравнению с нижними слоями в верхних ее слоях отмечено улучшение оструктуренности и увеличение площади удельной поверхности, а также содержания гумуса. Полученные нами результаты подтверждают ранее проведенные исследования о том, что зарастание агродерново-подзолистых почв в таежно-лесной зоне приводит к дифференциации пахотного слоя: на верхнюю его часть накладывается дерновый процесс почвообразования, а в нижней его части проявляется подзолистый процесс (Леднев, Дмитриев, 2017; Леднев и др., 2020). В нашем случае установлен устойчивый тренд обезыливания верхней части постагрогенной толщи по сравнению с нижними слоями, что свидетельствует о возобновлении элювиально-иллювиальных процессов в дерново-подзолистых почвах при снятии антропогенной нагрузки. В хроноряду пашня-залежь в суглинистых почвах были выявлены как проградационные процессы, но явные проявления деградационных процессов по сравнению с пахотными аналогами (увеличение потенциальной кислотности и квазиравновесное содержание гумуса в ряду пашня-залежь).

3. Полученные данные представляются важными в отношении стратегии использования земельных ресурсов Ярославской области при переводе почв многолетних залежей в пахотное состояние и должны учитываться при проведении кадастровой оценки земель сельскохозяйственного назначения.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проект № 19-29-05243).

Литература

Аринушкина Е.В. (1970) Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ. 487 с.

Афонченко Н.В., Глазунов Г.П., Двойных В.В., Бойченко М.Н., Шишкова Т.А. (2016) Влияние освоения залежных земель на агрофизические свойства чернозема выщелоченного в Центрально-Черноземном регионе. Аграрная наука сельскому хозяйству: сборник статей в 3 книгах. Барнаул: ФГБОУ ВО «Алтайский ГАУ», 305-306.

Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес де Греню В.О., Овсепян Л.А., Телеснина В.М., Цветкова Ю.Д. (2017) Изменение агрегатного состава различных типов почв в ходе залежной *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева* **88**, 47-74. doi: 10.19047/0136-1694-2017-88-47-74

Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации 2021–2030. [Электронный ресурс] URL:

<http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=PNPA&n=54574&dst=100020#0> 025214597522799753 (дата обращения: 10.11.2022).

- Замотаев И.В., Белобров В.П., Курбатова А.Н., Белоброва Д.В. (2016) Агрогенная и постагрогенная трансформация почв Львовского района Курской области *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева* **85**, 97-114.
- Ипатов В.С., Мирин Д.М. (2008) Описание фитоценоза: методические рекомендации. СПб, 71 с.
- Классификация и диагностика почв СССР (1977). М., «Колос». 221 с.
- Кундиус В.А., Воронкова О.Ю. (2015) Эколого-экономические предпосылки использования залежных земель Алтайского края в направлении производства органической продукции *Вестник Алтайской науки* **3,4**, 295-302.
- Леднев А.В., Дмитриев А.В. (2015). Изменение агрофизических показателей агродерново-подзолистых почв на склоновых участках залежных земель при разных сроках их зарастания *Аграрная наука Евро-Северо-Востока* **5**, 57-62.
- Леднев А.В., Дмитриев А.В. (2017) Зарастание залежных дерново-подзолистых почв как фактор современного почвообразовательного процесса *Российская сельскохозяйственная наука* **5**, 28-31.
- Леднев А.В., Дмитриев А.В., Попов Д.А. (2020) Изменение агрохимических показателей залежных дерново-подзолистых почв при их освоении в пашню *Российская сельскохозяйственная наука* **5**, 42-45.
- Растворова О.Г. (1983) Физика почв (Практическое руководство). Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 196 с.
- Русаков А.В., Попов А.И., Симонова Ю.В., Рюмин А.Г., Мирин Д.М. (2022) Изменение структурного состояния и некоторых свойств почв разновозрастных залежей Ярославского Поволжья в контексте оценки земельных ресурсов региона *Использование и охрана природных ресурсов в России (Use and protection of natural resources of Russia. Scientific, informative and analytical bulletin)* **3 (171)**, 32-43.
- Сапожников П.М., Шевченко А.В. (1989). Экспресс-метод определения общей удельной поверхности почв *Почвоведение* **11**, 148-150.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. (2004) Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 342 с.
- Baver L.D. (1956) Soil physics. 3d ed. New York-London. John Wiley and Sons. Inc. 489 p.

УДК 631.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЩЕСТВА ПОЧВ: ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Рыжова И.М.^{1, 2}, Романенков В.А.², Степаненко В.М.²

¹Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
iryzhova@mail.ru, romanenkov@soil.msu.ru

² Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва,
Российская Федерация
stepanen@srcc.msu.ru

MODELING THE DYNAMICS OF SOIL ORGANIC MATTER: MAIN PROBLEMS AND
DIRECTIONS OF DEVELOPMENT

Ryzhova I.M.¹, Romanenkov V.A.¹, Stepanenko V.M.²

¹Soil Science Faculty LMSU, Moscow, Russian Federation
iryzhova@mail.ru, romanenkov@soil.msu.ru

²Research Computing Centre LMSU, Moscow, Russian Federation
stepanen@srcc.msu.ru

Annotation: The review presents the results of the development of models for the dynamics of soil organic matter over the past decade. The following areas are being discussed: microbial roles in SOM stabilization, SOM saturation kinetics, temperature controls on SOM dynamics, deep SOM dynamics, and modeling SOM in ESMs.

Введение

Почвы играют ведущую роль в биогеохимическом цикле углерода. Запасы органического углерода в верхнем метровом слое почвы составляют 1500-2400 Гт. Даже нижняя оценка этого диапазона примерно в три раза превышает запасы углерода в растительном покрове и в два раза его запасы в атмосфере (Smith et al., 2019). В зависимости от условий почвы могут быть, как источником, так и стоком углерода и оказывать существенное воздействие на атмосферу и климат. Поэтому большое внимание уделяется эффективному управлению почвами, направленному на увеличение содержания в них органического вещества, чтобы способствовать смягчению последствий изменения климата и повышению плодородия почв. Прогнозирование изменений запасов органического углерода почв является трудной задачей, так как они зависят от комплекса взаимодействующих биоклиматических, литологических, геоморфологических и антропогенных факторов. Одним из наиболее эффективных методов изучения и прогнозирования динамики органического вещества почв, позволяющих глубже понять поведение этой сложной открытой кинетически гетерогенной системы, является математическое моделирование. В настоящее время известно порядка 220-250 моделей (Manzoni, Porporato, 2009; Campbell, Paustian, 2015). Характеристике биогеохимических

моделей, истории их развития и обсуждению проблем моделирования динамики органического вещества почв посвящены вышедшие в последнее время обзоры (Manzoni, Porporato, 2009; Рыжова, 2011; Чертов, Комаров, 2013; Stockmann et al., 2013; Campbell, Paustian, 2015; Чертов, Надпорожская, 2016).

Разнообразие и особенности моделей во многом определяются пространственно-временным масштабом описываемых процессов, а также обусловлены различиями основных концепций, лежащих в основе моделей. Трудности моделирования динамики органического вещества почв в первую очередь связаны с его кинетической гетерогенностью. Чтобы решить эту проблему, в наиболее распространенных традиционных моделях органическое вещество почв представляют конечным числом пулов, каждый из которых характеризуется специфической константой скорости разложения. Предполагается, что скорость разложения следует кинетике первого порядка. Как правило, эти модели имеют сходную структуру, которая представляет собой цепь, звеньями которой являются пулы с возрастающим временем оборота. Выбор пулов и их количество является умозрительным. Большинство из них не имеют экспериментально определяемых аналогов, что создает проблемы инициализации и проверки моделей. Традиционные модели (CENTURY, RothC, DNDC и др.) просты в математическом отношении и могут быть полезными для решения широкого круга экологических проблем. Однако они не отражают достижения последнего времени в понимании динамики органического вещества почв.

Развитие экспериментальных методов изучения органического вещества почв и успехи почвенной микробиологии в значительной степени изменили представления о механизмах, определяющих его устойчивость. В соответствии с ними устойчивость органического вещества почв рассматривается как экосистемное свойство и определяется соотношением между его доступностью микроорганизмам и защитой от разложения в результате органоминеральных взаимодействий и образования микроагрегатов. (Семенов, Когут, 2015; Schmidt et al., 2011; Blankinship et al., 2018). Эта концепция послужила основой моделей нового поколения, в которых, в отличие от традиционных моделей, явно описаны субстрат-микробные взаимодействия, а пулы выделены на основе конкретных механизмов стабилизации органического вещества и имеют экспериментально определяемые аналоги. В качестве примеров моделей нового поколения можно привести Millennial (Abramoff et al., 2018), MEMS (Robertson et al., 2019).

Кэмпбелл и Паустиан (Campbell, Paustian, 2015) выделили пять следующих наиболее важных областей дальнейшего развития моделей динамики органического вещества почв: роль микробов в стабилизации органического вещества почв; кинетика насыщения почв органическим углеродом; температурный контроль динамики ОВ почв; динамика органического вещества в глубоких слоях почв;

представление динамики органического углерода почв в глобальных климатических моделях.

В этом обзоре мы обсудим нерешенные проблемы и продвижения в каждом из этих направлений за последнее десятилетие.

Роль микробов в стабилизации органического вещества почв

В настоящее время отмечается активное развитие микробных моделей. В периоды 2007–2014 и 2015–2022 гг. было предложено соответственно 22 и 36 моделей. История развития микробных моделей, сравнительный обзор основных микробных процессов и характеристики 71 модели представлены в обзоре Chandel et al. (2023). Авторы широко трактуют понятие микробная модель. Они относят к микробным моделям все биогеохимические модели цикла углерода (или в сочетании с циклами других биофильных элементов), включающие хотя бы один пул микробной биомассы. Поэтому в выборку попало десять традиционных линейных моделей, в которых есть пул микробной биомассы, но микробы представлены не как как деструкторы, а как пул лабильного органического вещества. В этих моделях лишь предполагается, что все процессы разложения органического вещества являются результатом микробной деятельности, но микробная активность учитывается неявно через константы скоростей разложения. Традиционные модели основаны на предположении, что количество активной микробной биомассы находится в равновесии с количеством субстрата и не ограничивает процесс разложения. Более чем 80% микробных моделей, явно описывающих микробное разложение органического вещества почв, являются нелинейными.

Lawrence et al. (2009) показали, что краткосрочная динамика органического вещества почв в условиях быстрой смены условий окружающей среды (например, высыхание и повторное увлажнение) не может быть адекватно описана моделями, в которых не отражены механизмы микробного контроля, а для описания разложения используются линейные функции. В настоящее время необходимость явного описания поведения микробов в моделях, описывающих краткосрочную динамику органического вещества почв, является общепризнанной. Кроме того, увеличилось количество моделей нового поколения, которые включают субстрат-микробные взаимодействия для представления долгосрочной динамики органического углерода почв в масштабе от экосистемы до глобального уровня (Wang et al., 2017; Schimel, 2023). При этом возникает проблема перехода от моделей мелкого к моделям более крупного масштаба из-за трудностей определения, какие из множества механизмов, действующих в мелком масштабе нужны для адекватного описания динамики органического вещества почв в крупном пространственно-временном масштабе. В настоящее время сложилось общее представление, что важную роль в круговороте органического углерода в почве играют субстрат-микробные взаимодействия, органо-минеральные взаимодействия и процессы физической защиты органического

вещества в результате включения в состав микроагрегатов и его освобождения при их разрушении. Однако, нет единого мнения о том, какие математические формулировки являются лучшими для представления этих процессов в моделях. Для описания процессов микробного разложения органического вещества используют прямую и обратную функции Михаэлиса-Ментен, приближение равновесной химии (ЕСА) и др. В зависимости от принятых допущений используются различные формулировки для описания органо-минеральных взаимодействий (Dwivedi et al., 2019; Abramoff et al., 2022).

Остается открытым вопрос о том какие микробные пулы и сколько необходимо включить в модели нового поколения, для адекватного описания динамики углерода в почве. Например, в структуре модели Millennial (Abramoff et al., 2022) один пул микробной биомассы, в модели MIMICS есть две группы микроорганизмов: одна активна в отношении метаболических компонентов растительного опада, а другая - в отношении структурного опада; обе также могут использовать органический углерод почвы (Wieder et al., 2014), в модели CORPSE также два пула микробной биомассы, но они разделены в пространстве: один действует в ризосфере, а другой - в основной массе почвы. (Sulman et al., 2014).

Для развития моделей, позволяющих лучше понять влияние микробных процессов и органо-минеральных взаимодействий на динамику органического углерода почв большое значение имеют сравнение и проверка моделей. Sulman et al. (2018) провели сравнение и проверку моделей, используя результаты 147 полевых экспериментов по изучению влияния потепления и увеличения поступления органического углерода в почву на его запасы и дыхание почв. Сравнивались одна традиционная модель DAYCENT (версия модели CENTURY) и четыре модели нового поколения, которые явно представляют активность и рост почвенной микробной биомассы и ее влияние на скорость разложения, а также рассматривают физическую защиту органического вещества от микробного разложения в микроагрегатах или сорбцию минеральными поверхностями CORPSE (Sulman et al. 2014), MIMICS (Wieder et al., 2014), MEND (Wang et al., 2015) и RESOM (Tang and Riley, 2015). В результате был сделан вывод, что данных наблюдений было недостаточно, чтобы опровергнуть любую из сравниваемых модельных структур. Таким образом, дальнейшее развитие моделей динамики органического вещества почв в настоящее время сдерживается недостатком данных для их сравнения и проверки.

Кинетика насыщения почв органическим углеродом

Концепция насыщения почвы органическим углеродом допускает существование верхнего предела («уровня насыщения») количества органического вещества, которое может закрепляться в почве (Six et al., 2002; Stewart et al., 2007). Предполагается, что закрепление ОВ происходит в результате органо-минеральных

взаимодействий и физической защиты от микробного разложения при включении в микроагрегаты. По мнению ряда исследователей, насыщение почвы углеродом может быть связано также с экологическими ограничениями роста микробной биомассы (Craig et al., 2021). Некоторые модели нового поколения отражают концепцию насыщения (Ahrens et al., 2015; Abramoff et al., 2018).

При моделировании насыщения почвы органическим углеродом в рамках традиционных моделей возникают трудности, связанные с тем, что пулы являются концептуальными, выбраны по скоростям оборота и не имеют измеряемых аналогов. Эта проблема исчезает при переходе к моделям, где пулы определены в соответствии с механизмами стабилизации органического вещества и измеряемы.

В литературе представлены оценки уровня насыщения почв, полученные путем анализа большого массива данных, характеризующего содержание углерода во фракциях, выделенных по размеру или плотности, минералогию и гранулометрический состав естественных и сельскохозяйственных почв разных биоклиматических регионов. Показано, что уровень насыщения почв органическим углеродом определяется их минералогией и гранулометрическим составом, а степень насыщения зависит от климата, растительного покрова и характера землепользования (Когут, Семенов, 2020; Georgiou et al. 2022) Эти количественные оценки могут быть использованы для параметризации моделей, описывающих насыщение почвы органическим углеродом.

Нами проведен сравнительный анализ динамики органического углерода почв на основе двух базовых, не отягощенных деталями моделей - традиционной линейной и нелинейной модели SOCS (Soil Organic Carbon Saturation), отражающей насыщение почвы органическим углеродом. Модель основана на предположении, что по мере заполнения углерод-протекторной емкости почвы уменьшается ее способность к защите органического вещества от микробного разложения. Она не описывает в явном виде каждый из механизмов стабилизации органического вещества в почве, а оценивает их интегральное влияние на поведение системы. Рассматривались двухкомпонентные модели. В традиционной линейной модели органический углерод почвы представлен двумя пулами, различающимися по скоростям оборота. Модель SOCS описывает динамику свободного (незащищенного) и защищенного органического вещества. Эти пулы измеримы их оценки могут быть получены по результатам гранулометрического или гранулоденсиметрического фракционирования. Проведенный анализ показал, что в отличие от традиционной модели, демонстрирующей линейный рост стационарных запасов быстрого и медленного пулов с увеличением поступления органического углерода в почву, в соответствии с моделью SOCS линейно увеличивается только стационарный запас свободного органического вещества, тогда как стационарный запас защищенного органического углерода асимптотически приближается к уровню насыщения. Результаты расчетов, выполненные для целинных черноземов,

показали, что они характеризуются очень низкой долей незащищенного органического вещества по отношению к его общим запасам в верхнем слое почвы, что согласуется с литературными данными, полученными экспериментально. При моделировании отклика пахотных черноземов на применение высоких доз органических удобрений линейная модель его завышает по сравнению с моделью SOCS.

Температурный контроль динамики ОВ почв

В традиционных моделях для описания температурной зависимости использовались различные эмпирические функции. Их сравнение приведено в статье (Tuomi et al 2008). Неопределенность прогнозов отклика динамики органического вещества почв на изменения температуры связана с дискуссионностью вопроса о температурной чувствительности органического вещества почв. В результате многочисленных исследований были получены противоречивые данные о температурной чувствительности, на основе которых было сформулировано несколько взаимоисключающих гипотез. Возможные причины противоречивости результатов, в первую очередь, объясняются сложностью проблемы. В соответствии с кинетической теорией температурная чувствительность увеличивается с ростом устойчивости субстрата. Но в почве «наблюдаемая» температурная чувствительность может отличаться от теоретической из-за воздействия комплекса факторов окружающей среды (Davidsons, Janssens, 2006). В связи с этим трудно определить, какая из гипотез реализуется в почве в зависимости от сочетания разных условий. Выбор гипотезы при описании температурной чувствительности разложения органического вещества почв имеет большое значение при моделировании углеродного цикла, так как от этого зависит степень проявления обратной связи между климатическими изменениями и почвой (Рыжова, 2013).

Для развития моделей нового поколения, явно описывающих динамику микробной биомассы, от которой зависит скорость трансформации органического вещества, большое значение имеют исследования температурной чувствительности показателя эффективности использования углерода (CUE). Большинство исследований показывают, что она снижается с повышением температуры, что ограничивает разложение и потерю органических веществ (Schimel, 2023).

На уменьшение неопределенности прогнозов отклика динамики органического вещества почва на климатические изменения направлены исследования чувствительности скорости разложения органического вещества от взаимодействия температуры и влажности (Sierra et al 2015).

Динамика органического вещества в глубоких слоях почв

Большинство моделей описывает динамику органического вещества в верхнем слое почв мощностью 20 или 30 см, что объясняется его более быстрым оборотом и большей чувствительностью к хозяйственным воздействиям, чем органическое

вещество более глубоких слоев почв. Однако, в почвоведении всегда уделялось большое внимание изучению распределения органического вещества в профиле почв и первые модели, описывающие вертикальное распределение органического углерода в почве появились еще в конце 70-х годов прошлого века, но активно развиваться они начали только в 21 веке. Моделирование динамики органического углерода в глубоких слоях почвы основано на представлениях о вертикальной миграции водорастворимого органического вещества, биотурбациях, вертикальном распределении поступлении корневого опада. Для улучшения этих моделей может быть важен учет прайминг-эффекта. Модели динамики органического углерода в глубоких слоях различаются по уровню сложности. Их характеристика приведена в обзоре (Campbell, Paustian, 2015). О развитии этого направления исследований в последнее десятилетие можно судить по моделям COMMISSION (Ahrens et al.2015) и OC-VGEN (Keyvanshokouhi et al.2019). Модель COMMISSION, описывает динамику содержания органического углерода с учетом его распределения в почвенном профиле на основе представлений о микробных взаимодействиях, сорбции минералами и вертикальном переносе. Профиль разделен на несколько слоев, в текущей реализации 100, и разные слои получают органический углерод либо в виде поступления надземного опада сверху, вертикально распределенного поступления корневого опада, либо переноса из других слоев с потоком воды или биотурбаций. Модель OC-VGEN имеет модульную структуру и описывает динамику профильного распределения содержания органического углерода, тепла, воды и газов, а также биотурбации. Она была проверена по результатам долгосрочных экспериментов на лювисолях, которые включали разные виды землепользования (выращивание сельскохозяйственных культур, пастбища) и методы обработки почв. На основе OC-VGEN были получены прогнозы поведения почв при разных климатических сценариях и системах землепользования до 2100 года.

Представление динамики органического углерода почв в глобальных моделях

Для снижения неопределенности прогнозов глобального изменения климата очень важна реакция почв, на изменение температуры, количества осадков и концентрации CO₂ в атмосфере, так как запасы почвенного углерода чувствительны к этим показателям. Поэтому для надежной оценки баланса углерода важно с достаточной точностью моделировать современный уровень накопления углерода в почве. Глобальные модели имитируют взаимодействия климата и биогеохимических циклов. В рамках проекта взаимного сравнения связанных моделей (CMIP), CMIP5 было показано, что модельные оценки глобальных запасов углерода в почве варьировали от 510 до 3040 Пг С по сравнению с оценкой Гармонизированной мировой базы данных по почвам (HWSD) в 1 260 Пг С (с 95% доверительным интервалом 890–1 660 Пг С). Пространственное распределение запасов углерода в почве, плохо коррелировало с HWSD (коэффициенты корреляции Пирсона менее 0,4

и среднеквадратические ошибки от 9,4 до 20,8 кг С м²) (Todd-Brown et al., 2013). Результаты последнего поколения моделей CMIP6 лучше по сравнению с CMIP5, но сохраняется несогласованность в пространственном распределении запасов углерода, в частности недооценка запасов в почвах северных широт (Varney et al., 2022). Предполагается, что улучшение моделирования процессов превращения органического углерода в почве снизит неопределенность прогнозов. В последнее десятилетие были определены основные направления исследований, для получения более реалистичных прогнозов динамики запасов углерода на основе глобальных моделей (Luo, Y., et al., 2016; Dwivedi et al., 2019). Они включают сбор информации необходимой для улучшения экспериментального обеспечения и проверки моделей, и поиск оптимальной структуры. В настоящее время в большинство глобальных моделей для описания динамики органического углерода почв встроены традиционные линейные модели. Использованию моделей нового поколения препятствует высокая вариативность их структуры. Поэтому актуальной задачей является поиск подходящей для глобального моделирования модели, отражающей современное понимание роли микроорганизмов, минеральных ассоциаций и агрегирования в динамике органического вещества почв. Для этого очень полезным может быть созданный в рамках численной модели деятельного слоя суши (ДСС) ИВМ РАН-МГУ универсальный конструктор моделей углеродного цикла (УЦ) в почве и растительности для возможности реализации широкого спектра существующих и перспективных моделей.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке АИС-НОШ № 23-Ш07-55.

Литература

- Когут Б.М., Семенов В.М. (2020) Оценка насыщенности почвы органическим углеродом. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева* **102**, 103-124. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124.
- Рыжова И.М. (2011) Проблемы и перспективы моделирования динамики органического вещества почв. *Агрехимия* **12**, 71–80.
- Рыжова И.М. (2013) Проблемы описания температурной чувствительности разложения органического вещества почв в моделях круговорота углерода// Математическое моделирование в экологии. Материалы Третьей Национальной научной конференции с международным участием, 21-25 октября 2013 г, Пущино, ИФХиБПП РАН, с. 220-221.
- Семенов В.М., Когут Б.М. (2015) Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 233 с.
- Чертов О.Г., Комаров А.С. (2013) Теоретические подходы к моделированию динамики содержания органического вещества почв. *Почвоведение* **8**, 937–946.

- Чертов О.Г., Надпорожская М.А. (2016) Модели динамики органического вещества почв: проблемы и перспективы. *Компьютерные исследования и моделирование* **8(2)**, 391-399.
- Abramoff, R., Xu, X., Hartman, M., et al., (2018) The Millennial model: in search of measurable pools and transformations for modeling soil carbon in the new century. *Biogeochemistry* **137**, 51–71. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0409-7>.
- Abramoff, R.Z., Guenet, B., Zhang, H., Georgiou, K., Xu, X., Viscarra Rossel, R.A., Yuan, W., Ciais, P. (2022) Improved global-scale predictions of soil carbon stocks with Millennial Version 2. *Soil Biology and Biochemistry* **164**, 108466. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108466>.
- Ahrens, B., Braakhekke, M.C., Guggenberger, G., et al., (2015) Contribution of sorption, DOC transport and microbial interactions to the 14C age of a soil organic carbon profile: insights from a calibrated process model. *Soil Biology and Biochemistry* **88**, 390–402. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.008>.
- Blankinship, J.C., Berhe, A.A., Crow, S.E., Druhan, J.L., Heckman, K.A., Keiluweit, M., Lawrence, C.R., Marín-Spiotta, E., Plante, A.F., Rasmussen, C., Schadel, C., Schimel, J.P., Sierra, C.A., Thompson, A., Wagai, R., Wieder, W.R., (2018) Improving understanding of soil organic matter dynamics by triangulating theories, measurements, and models. *Biogeochemistry* **140**, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0478-2>
- Campbell E.E., Paustian K. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review. *Environ. Res. Lett.* **10**, 123004. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/123004>.
- Chandel A.K., Jiang L., Luo Y. (2023) Microbial Models for Simulating Soil Carbon Dynamics: A Review. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **128(8)** <https://doi.org/10.1029/2023JG007436>
- Craig E.M. Mayes M.A., Sulman B.N., Walker A.P. (2021) Biological mechanisms may contribute to soil carbon saturation patterns. *Glob Change Biol.* **27**, 2633-2644. DOI: 10.1111/gcb.15584
- Davidson E A, Janssens IA and Luo Y (2006) On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q10. *Glob. Change Biol.* **12**, 154–64 DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x
- Dwivedi D., Tang J., Nicholas Bouskill N., Georgiou K., Chacon S.S., Riley W.J. (2019) Abiotic and Biotic Controls on Soil Organo–Mineral Interactions: Developing Model Structures to Analyze Why Soil Organic Matter Persists. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **85**, 329–348. <https://doi.org/10.2138/rmg.2019.85.11>
- Georgiou K. et al. (2022) Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nature communications* **13**:3797 <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9>
- Keyvanshokouhi S. et al. (2019) Effects of soil process formalisms and forcing factors on simulated organic carbon depth-distributions in soils. *Science of the Total Environment* **652**, 523–537 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.236>

- Lawrence, C.R., Neff, J.C., Schimel, J.P., (2009). Does adding microbial mechanisms of decomposition improve soil organic matter models? A comparison of four models using data from a pulsed rewetting experiment. *Soil Biology & Biochemistry* **41**, 1923–1934. DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.06.016
- Luo, Y., et al. (2016), Toward more realistic projections of soil carbon dynamics by Earth system models. *Global Biogeochem. Cycles*, **30**, 40–56 doi:10.1002/2015GB005239.
- Manzoni S., Porporato A. (2009) Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biology & Biochemistry* **41**, 1355–1379. 10.1016/j.soilbio.2009.02.031
- Robertson A.D., Paustian K., Ogle S., Wallenstein M.D., Lugato E., Cotrufo M.F. (2019) Unifying soil organic matter formation and persistence frameworks: the MEMS model. *Biogeosciences*, **16**, 1225–1248. <https://doi.org/10.5194/bg-16-1225-2019>.
- Schimel J. (2023) Modeling ecosystem-scale carbon dynamics in soil: The microbial dimension. *Soil Biology and Biochemistry* **178**, 108948 <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.108948>
- Schmidt M., Torn M., Abiven, S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I., Kleber M., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Manning D., et al. (2011) Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*. **478(7367)**, 49-56. doi: 10.1038/nature10386.
- Sierra, C., Muller, M., (2015). A general mathematical framework for representing soil organic matter dynamics. *Ecological Monographs* **16**, 16881. <https://doi.org/10.1890/15-0361.1>.
- Six J., Conant R., Paul E. A., Paustian, K. (2002) Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, **241**, 155–176. DOI: 10.1023/A:1016125726789
- Smith P. et al. (2019) How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology* **26**, 219-241 <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
- Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T., Plante A.F., Six, J., (2007). Soil C saturation: concept, evidence, and evaluation. *Biogeochemistry* **86**, 19–31.
- Stockmann U., Adams M.A., Crawford J.W., Field D.J., Henakaarchchi N., Jenkins M., Minasny B., McBratney A.B. Courcelles V. de R. de Singh K., Wheeler I., Abbott L., Angers D.A., Baldock J., Bird M., Brookes P.C., Chenu C., Jastrow J.D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell, A.G., Parton W.J., Whitehead, D, Zimmermann M. (2013) The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. - *Agric. Ecosyst. Environ.* **164**, 80-99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>.
- Sulman BN, Phillips RP, Oishi AC, Shevliakova E, Pacala SW (2014) Microbe-driven turnover offsets mineral-mediated storage of soil carbon under elevated CO2. // *Nat Clim Change* **4**:1099–1102. <https://doi.org/10.1038/nclimate.2436>

- Sulman B.N., Moore J.A.M., Abramoff R., Averill C., Kivlin S., et al. (2018) Multiple models and experiments underscore large uncertainty in soil carbon dynamics *Biogeochemistry*. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0509-z>
- Tang JY, Riley WJ (2013) A total quasi-steady-state formulation of substrate uptake kinetics in complex networks and an example application to microbial litter decomposition. *Biogeosciences* **10**, 8329–8351. <https://doi.org/10.5194/bg-10-8329-2013>
- Todd-Brown, K. E. O.; Randerson, J. T.; Post, W. M.; Hoffman, F. M.; Tarnocai, C.; Schuur, E. A. G.; Allison, S. D. (2013). Causes of variation in soil carbon simulations from CMIP5 Earth system models and comparison with observations. *Biogeosciences*, **10(3)**, 1717–1736. doi:10.5194/bg-10-1717-2013
- Tuomi M., Vanhala P., Karhu K., Fritze H., Liski J. (2008) Heterotrophic soil respiration – comparison of different models describing its temperature dependence. *Ecological Modelling*. **211**, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.09.003>
- Varney R.M., Chadburn S.E., Burke E.J., Cox P.M. (2022) Evaluation of soil carbon simulation in CMIP6 Earth system models. *Biogeosciences* **19**, 4671–4704 <https://doi.org/10.5194/bg-19-4671-2022>
- Wang G, Jagadamma S, Mayes MA, Schadt CW, Steinweg JM, Gu L et al (2015) Microbial dormancy improves development and experimental validation of ecosystem model. *ISME J* **9**, 226–237. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.120>
- Wieder WR, Grandy AS, Kallenbach CM, Bonan GB (2014) Integrating microbial physiology and physio-chemical principles in soils with the Microbial-MIneral Carbon Stabilization (MIMICS) model. *Biogeosciences* **11**, 3899–3917. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3899-2014>

УДК 631.439

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОТНОСТИ ПАХОТНОГО ГОРИЗОНТА АГРОСЕРЫХ ПОЧВ БРЯНСКОГО ОПОЛЯ

Самсонова В.П.¹, Кондрашкина М.И.¹, Кротов Д.Г.², Дядькина С.Е.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
kondra_mar@mail.ru

²Брянский аграрный университет, пос. Кокино Брянской области

Spatial variability of the density of the arable horizon in the agro-grey soils in the Bryansk region

Samsonova V.P.¹, Kondrashkina M.I.¹, Krotov D.G.², Dyadkina S.E.¹

¹Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University

²Bryansk Agrarian University

Annotation: To calculate the stocks of soil organic carbon, it is necessary to know the bulk density of the soil, which, as a rule, is determined in one or a small number of sections, and the results apply either to the entire field or to the territory occupied by a certain classification soil unit. It is shown that the density within a land area of 10 hectares on Gray Forest soil formed on can vary from 0,98 to 1,48 g/cm³, with a coefficient of variation of 8,1%. The structure of spatial variability is described by a spherical semivariogram model with the following parameters: nugget=0,0063 (g/cm³)², partial threshold 0,0039 (g/cm³)², rang=33m. Based on this, the estimate of the analytical error in determining the soil bulk density is 0,078(g/cm³). The data can be used to estimate the stocks of organic carbon in similar conditions.

Введение

Для расчетов запасов почвенного органического углерода требуется знать плотность почвы, которая, как правило, определяется в одном либо в небольшом числе разрезов, а результаты распространяются либо на все угодье, либо на территорию, занимаемую определенной классификационной почвенной единицей. Сведений о пространственной изменчивости свойства очень немного. В данной работе мы представляем результаты исследований, проведенных на агросерых почвах Брянского ополья.

Объекты и методы

Исследования проводились на территории учебного хозяйства Брянской сельскохозяйственной академии в 2006 г. Рельеф – полого-волнистый, присутствуют небольшие замкнутые понижения. Почвенный покров исследуемого угодья представлен агросерыми почвами и агросерыми со вторым гумусовым горизонтом. Агросерые со вторым гумусовым горизонтом тяготеют к понижениям, агросерые - к вершинам и склонам. В гранулометрическом составе почв преобладает крупная пыль (более 60%), содержание ила низкое. В средней части профиля наблюдается

небольшое увеличение количества илстых частиц, которое вновь уменьшается при переходе к материнской породе (табл.1). По классификации Н.А. Качинского почвы относятся к легкосуглинистым.

Пробы объемом 100 см³ отбирались в июле 2006 г. из верхней части пахотного горизонта стандартным буром Качинского после удаления 1 см слоя почвы для выравнивания поверхности. На территории угодья площадью около 10 га по случайно-стратифицированной схеме с дополнительными точками опробования было отобрано 115 проб. Статистическая обработка проводилась в программе Excel, карта строилась в пакете SURFER 9.

Таблица 1. Гранулометрический состав почв опытного поля Брянской ГСХА.
Агросерая легкосуглинистая мощная почва на лессовидном суглинке

Почва	Глубина взятия образца, см	Гигр. влажн., %	Фракции, мм						Сумма частиц <0,01мм
			1- 0,25	0,25- 0,05	0,05- 0,01	0,01- 0,005	0,005- 0,001	<0,001	
<u>A_n</u>	12-16	2,90	2,04	14,64	61,41	7,23	7,01	7,67	21,91
0-40	28-33	2,70	0,66	15,96	62,26	4,97	6,59	9,56	21,12
<u>A₁A₂</u> 40-54	45-49	2,84	0,29	14,38	63,11	7,32	6,07	8,83	22,13
<u>A₂B</u> 54-68	60-64	3,77	0,25	29,99	60,51	6,76	2,49	18,07	27,32
<u>B₁</u> 68- 105	83-87	3,54	0,29	18,08	57,33	4,09	4,04	16,17	24,30
<u>BC</u> 105- 135	117-122	2,26	0,17	15,89	64,11	4,47	2,41	12,95	19,83
<u>C</u> >135	139-143	1,91	0,27	13,98	65,02	5,20	5,10	10,43	20,73

Результаты и обсуждение

Можно видеть, что степень пространственной изменчивости плотности в пределах угодья невелика, коэффициент вариации не превышает 10% (табл.2). Равенство медианы и среднего свидетельствуют о симметричности распределения, что подтверждается не только низкими значениями коэффициентов асимметрии и эксцесса, но и аппроксимацией нормальным законом распределения значений плотности (рис.1), поскольку значению критерия Шапиро-Уилка соответствует вероятность $p > 0,05$.

Таблица 2. Статистические характеристики плотности (г/см^3)

Повторность	115
Среднее	1,24
Медиана	1,24
Минимум	0,98
Максимум	1,48
Нижний квартиль	1,18
Верхний квартиль	1,30
Дисперсия	0,01
Стандартное отклонение	0,10
Коэффициент вариации	8,14
Асимметрия	-0,04
Экссесс	-0.19

Отметим, что после весенней вспашки к июлю средняя плотность в верхней части пахотного горизонта достигает значения $1,2 \text{ г/см}^3$, а четверть точек имеет плотность выше $1,3 \text{ г/см}^3$ (табл.1). Высокие значения образуют преимущественно округлые и слегка вытянутые области (рис.2), соответствующие участкам агросерых почв.

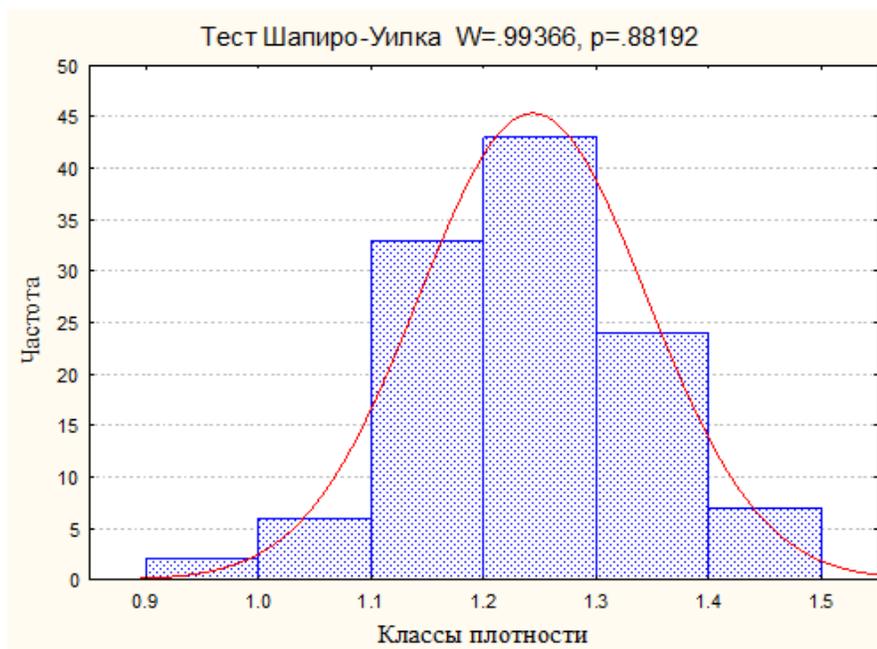


Рис. 1. Гистограмма плотности пахотного горизонта

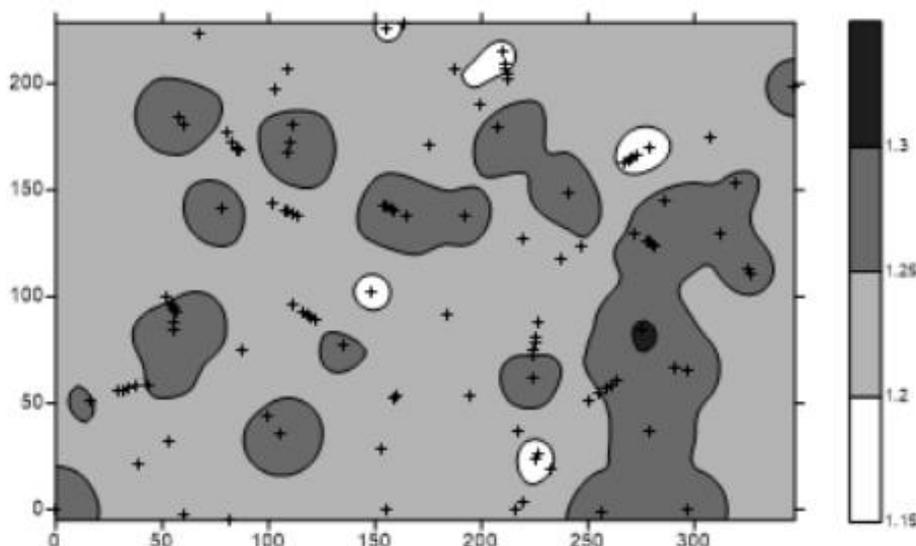


Рис. 2. Пространственное распределение значений плотности пахотного горизонта (г/см^3)

Структура пространственной изменчивости описывается сферической моделью семивариограммы:

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_1 \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & 0 \leq h \leq a, \\ c_0 + c_1, & h > a. \end{cases}$$

где $c_0=0,0063(\text{г/см}^3)^2$, $c_1=0,0039(\text{г/см}^3)^2$, h - расстояние, м, $a=33$ м.

Из этой формулы следует, что доля региональной изменчивости составляет чуть больше 38% от общей дисперсии плотности на площади 10 га, а случайная составляющая – 62%. Плотности в точках, разделенных расстоянием большим, чем 33 м, можно считать независимыми. Поскольку случайная составляющая состоит из аналитической ошибки и варьирования на малых расстояниях, то можно принять, что оценка аналитической погрешности определения плотности равна $S_{\text{анал}} = \sqrt{0,0063} = 0,078(\text{г/см}^3)$.

Заключение

Пространственная изменчивость плотности может вносить существенный вклад в точность оценки запасов почвенного органического вещества, поэтому мониторинговые наблюдения за запасами должны сопровождаться оценкой неоднородности плотности почвы.

Благодарность

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

УДК 336.211.1

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ КАДАСТРОВОЙ СТОИМОСТИ ЧЕРНОЗЕМОВ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

Сапожников П.М.¹, Корсикова С.А.², Кононцева Е.В.³, Данилова Н.И.⁴

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

sap-petr@yandex.ru

sofia.korsikova@yandex.ru

³ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, Барнаул, Российская Федерация

kononцеваasau@mail.ru

⁴Русское общество оценщиков, Москва, Российская Федерация

nadya01091998@mail.ru

DIFFERENTIATION OF THE CADASTRAL VALUE OF CHERNOZEMS IN THE ALTAI TERRITORY

Sapozhnikov P.M., Korsikova S.A., Konontseva E.V., Danilova N.I.

Soil Science Faculty of MSU, Altai State Agricultural University, Russian Society of Appraisers

Annotation: The differentiation of cadastral value and normative yield of chernozems in the Altai Territory is shown. Based on the median values, there is the following relationship: typical chernozems > leached chernozems > podzolized chernozems > ordinary chernozems > southern chernozems. The spread of indicators is due to changes in agroclimatic potential and the presence of negative properties.

Введение

Алтайский край расположен в Сибирском федеральном округе, на юго-востоке Западной Сибири. На юге и западе регион граничит с Казахстаном, на севере – с Новосибирской областью, на востоке – с Кемеровской областью, на юго-востоке с Республикой Алтай. Площадь составляет 168 тыс. кв. км, протяженность территории с запада на восток – 600 км, с севера на юг – 400 км.

Субъект является крупнейшим сельскохозяйственным регионом Российской Федерации, обеспечивающим выполнение задач национальной Доктрины продовольственной безопасности. Согласно Государственному докладу о состоянии и использовании земель в 2022 году общая площадь сельскохозяйственных земель края составляет 68,7% (11,534 млн, га). Регион имеет богатый фонд плодородных почв – черноземы занимают 51,5% территории. Доля распаханых пашен Алтайского Края находится на одном из самых высоких мест по субъектам страны и составляет 40,6%.

Наиболее развитыми процессами деградации, приводящими к изменению мощности гумусового горизонта, содержанию гумуса и физической глины, на территории края являются водная эрозия и дефляция (Бурлакова и др., 2005).

Кадастровая стоимость вычисляется для целей налогообложения и арендной платы, и, как следствие, выполняет роль регулирования системы земельных отношений. Оценка земель сельскохозяйственного назначения проводится по почвенным свойствам.

Расчет нормативной урожайности является неотъемлемым шагом для получения величин кадастровой стоимости. В то же время, нормативная урожайность относится к основным критериям оценки качества и классификации земель по их пригодности для использования в сельском хозяйстве (ГОСТ Р 70229—2022).

Объекты и методы

Данные о почвенных свойствах (содержание гумуса (%), мощность гумусового горизонта (см), содержание физической глины (%), негативные свойства), используемые в настоящей работе были получены в результате обследования Алтайского Гипрозема при проведении третьего тура почвенных обследований.

Сравнительная характеристика удельных показателей кадастровой стоимости (УПКС) осуществлялась по почвенным зонам, в связи с сильной вариацией почвообразующих факторов территории.

По данным почвенно-географического районирования края, территория подразделяется на следующие зоны (Бурлакова и др., 1988):

1. Зона каштановых почв сухих степей
2. Зона черноземов засушливой и умеренно засушливой степей
 - 2.1 Подзона южных черноземов засушливой степи
 - 2.2 Подзона обыкновенных черноземов умеренно засушливой и колочной степей
3. Зона выщелоченных черноземов и серых лесных почв средней лесостепи
4. Зона оподзоленных и выщелоченных черноземов, темно-серых и серых лесных почв предгорий Салаира
5. Зона дерново-глубокооподзоленных и серых лесных почв черневой тайги Салаирского кряжа
6. Зона черноземов предгорных равнин, предгорий и низкогорий Алтая
7. Зона горных лесных, черноземовидных и горно-луговых почв среднегорья Алтая

Первые пять зон расположены в равнинных частях территории (Кулундинская низменность, Приобское плато, Бие-Чумышская равнина). Часть шестой и седьмая зоны расположены в предгорных и горных частях Алтая.

Черноземы распространены во всех зонах края, кроме первой зоны — зоны каштановых почв сухих степей. В данной работе приводится характеристика по всем подтипам черноземов Алтайского края, а именно: черноземам выщелоченным (зона 2.2-7), черноземам обыкновенным (зона 2.2, 4, 6), черноземам оподзоленным (зона

3-7), черноземам типичным (зона 6,7), черноземам южным (зона 2.2), горным черноземам выщелоченным (зона 6,7), горным черноземам обыкновенным (зона 6), горным черноземам оподзоленным (зона 7).

Для характеристики пригодности климатических условий края под выращивание сельскохозяйственных культур использовался агроклиматический потенциал.

$$АП = \frac{\sum t > 10^{\circ}\text{C} \times (КУ - Р)}{КК + 100},$$

где $\sum t > 10^{\circ}\text{C}$ – сумма температур более 10°C

КУ – коэффициент увлажнения

Р – поправка к КУ

КК – коэффициент континентальности климата

Алтайский край подразделен на шесть агроклиматических подзон (Носов, 2010), отличающихся по границам с почвенно-климатическими зонами территории. После сопоставления границ для каждой зоны был определен агроклиматический потенциал и выбрана структура посевов.

Вычисление нормативной урожайности проводилось с учетом агроклиматического потенциала по следующей формуле:

$$НУ = 33,2 \times 1,4 \times \frac{АП}{10} \times К_1 \times К_2 \times К_3 \times К_4,$$

где НУ – нормативная урожайность зерновых культур, ц/га

АП – величина местного агроклиматического потенциала для зерновых культур (по И. И. Карманову)

10 – базовое значение АП

33,2 – нормативная урожайность (ц/га) зерновых культур на эталонной почве, соответствующая нормам нормальных зональных технологий при базовом значении АП (10)

1,4 – коэффициент пересчета на уровень урожайности при интенсивной технологии возделывания

К1 – поправочный коэффициент на содержание гумуса в пахотном слое

К2 – поправочный коэффициент на мощность гумусового горизонта

К3 – поправочный коэффициент на содержание физической глины в пахотном слое

К4 – поправочный коэффициент на негативные свойства почв

Расчет кадастровой стоимости осуществлялся согласно методическим указаниям о государственной кадастровой оценке земель сельскохозяйственного назначения (7) с использованием технических указаний (Сапожников, Носов, 2012) и специального программного обеспечения (Пшеничников и др., 2019).

$$КС = \frac{НУ \times Р - (З_Т + З_{пп})}{КК},$$

где Р – рыночная стоимость сельскохозяйственной культуры (ц/га)
 Z_T – удельные затраты на возделывание сельскохозяйственных культур
 $Z_{пп}$ – удельные затраты на поддержание плодородия почв
 КК – коэффициент капитализации

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлен размах показателей нормативной урожайности для зерновых культур. Значения нормативной урожайности подтипов горных черноземов не отображены, в связи с нерентабельностью выращивания.

Наибольшие показатели зафиксированы для черноземов типичных (медианные значения – 28.2 ц/га), наименьшие – для черноземов южных (16.9 ц/га). Для Краснодарского края, климатические условия которого считаются эталонными для выращивания зерновых культур (АП – 10), нормативная урожайность черноземов типичных варьирует от 42.4 ц/га до 54.0 ц/га (Шехтер, Сапожников, 2022), то есть максимальные значения превышают аналогичные показатели Алтайского края в 1.8 раз. Касаясь остальных почв максимальные показатели Краснодарского края оказались больше в 1.6 раз для черноземов выщелоченных, в 1.8 для черноземов обыкновенных и в 2.4 для южных черноземов.

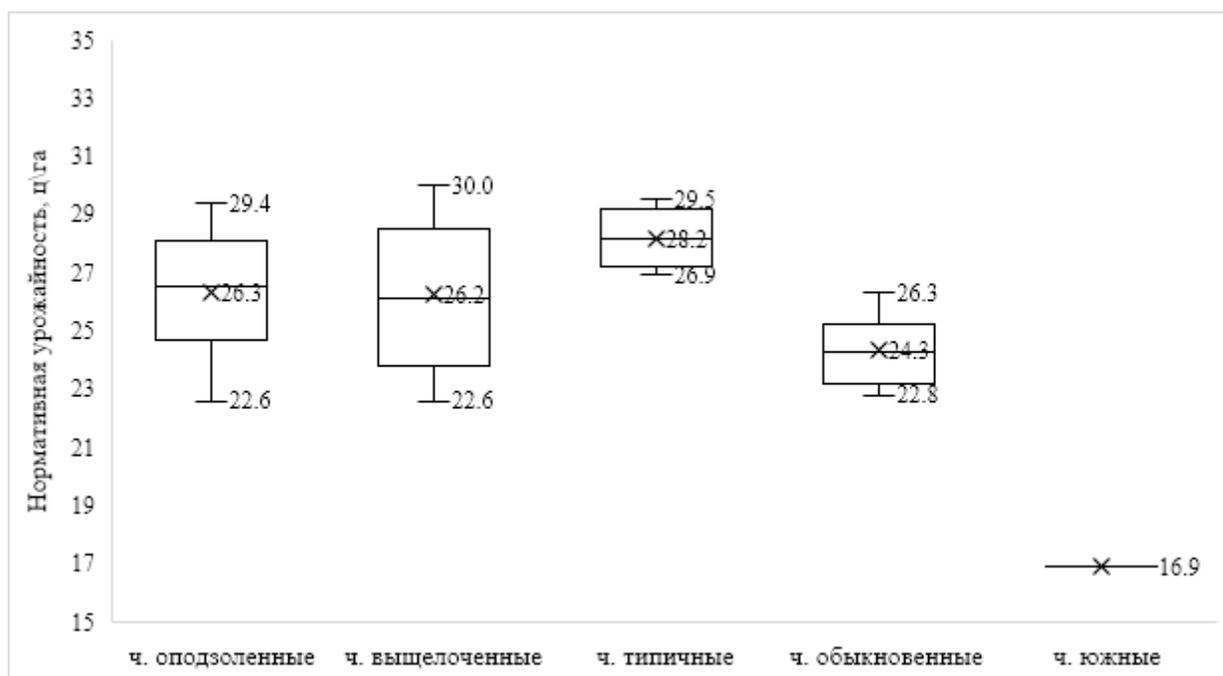


Рис.1. Нормативная урожайность зерновых

По медианным значениям удельных показателей кадастровой стоимости в ряду черноземов Алтайского края можно выделить следующую зависимость: черноземы типичные > черноземы выщелоченные > черноземы оподзоленные > черноземы обыкновенные > черноземы южные (рис. 2). Максимальное значение кадастровой стоимости характерно для черноземов выщелоченных и составляет 17.2 руб./м² (таблица 1). Минимальные показатели характерны подтипам горных черноземов от 0.15 руб./м² до 0.2 руб./м², расчет показателей подтипов проводился по сенокосам и пастбищам.

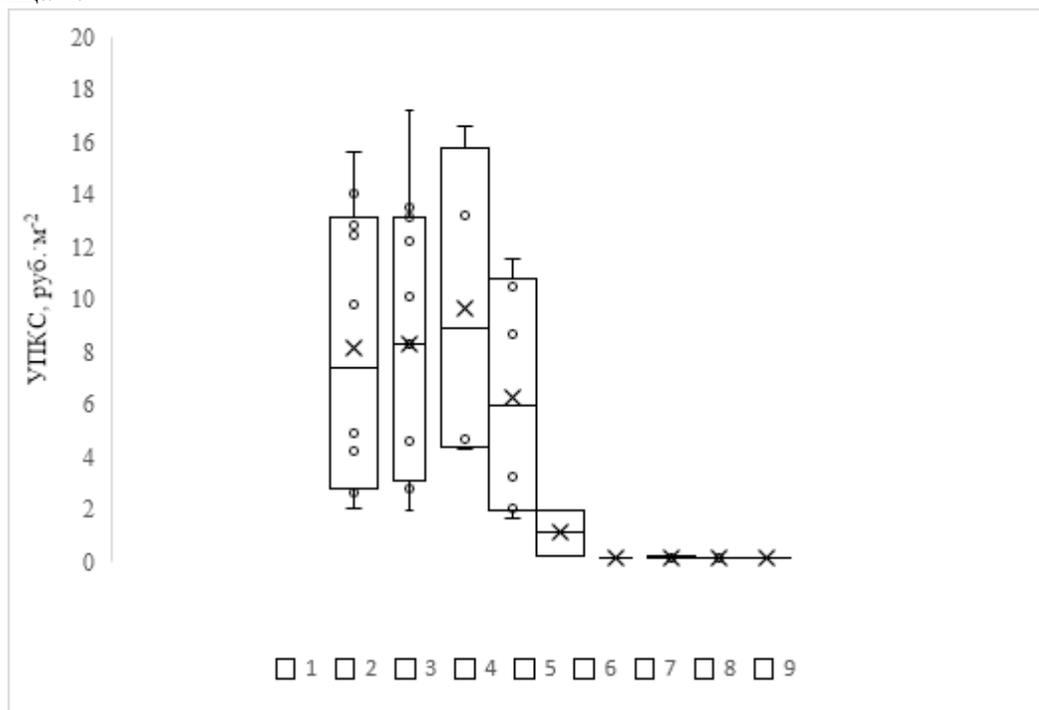


Рис. 2. Дифференциация УПКС в ряду черноземов

1 – черноземы оподзоленные; 2 – черноземы выщелоченные; 3 – черноземы типичные; 4 – черноземы обыкновенные; 5 – черноземы южные; 6 – горные черноземы оподзоленные; 7 – горные черноземы выщелоченные; 8 – горные черноземы типичные; 9 – горные черноземы обыкновенные

Для черноземов наблюдается широкий размах значений, так, для подтипа выщелоченных черноземов значения изменяются от 1.96 руб./м² до 17.2 руб./м². Большой разброс показателей внутри одного подтипа черноземов обусловлен изменением агроклиматического потенциала и наличием негативных свойств.

Удельные показатели кадастровой стоимости возрастают с увеличением агроклиматического потенциала подзоны для одинаковых подтипов черноземов (рис. 4). На графике видно, что диапазон значений и медиана смещаются вверх по

оси у с ростом агроклиматического потенциала. Ранее для агроландшафтов Сибири уже было отмечено влияние агроклиматического потенциала на величину кадастровой стоимости (Сапожников, Данилова, 2022).

Таблица 1. Статистические характеристики удельных показателей кадастровой стоимости черноземов, руб/м²

	Максимум	Верхний квартиль	Медиана	Среднее значение	Нижний квартиль	Минимум
Черноземы оподзоленные	15.64	12.71	7.36	8.13	3.17	2.01
Черноземы выщелоченные	17.20	12.64	8.33	8.32	3.84	1.96
Черноземы типичные	16.60	14.04	8.92	9.69	4.56	4.30
Черноземы обыкновенные	11.56	10.04	5.97	6.29	2.36	1.68
Черноземы южные	1.99	1.54	1.10	1.10	0.65	0.20
Горные черноземы оподзоленные	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
Горные черноземы типичные	0.19	0.19	0.18	0.18	0.16	0.16
Горные черноземы обыкновенные	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Горные черноземы выщелоченные	0.20	0.20	0.18	0.18	0.16	0.16

Негативные свойства изменяют стоимость до 81% для почв, обладающих равным агроклиматическим потенциалом. Водная эрозия при слабой выраженности влияет от 2 % для черноземов оподзоленных до 23% для черноземов южных. Большее снижение стоимости для черноземов южных связано с изначально менее благоприятными свойствами. Сильная смытость понижает показатели от 66% до 81%. Дефлированность в зависимости от степени выраженности оказывает влияние от 23% до 92%.

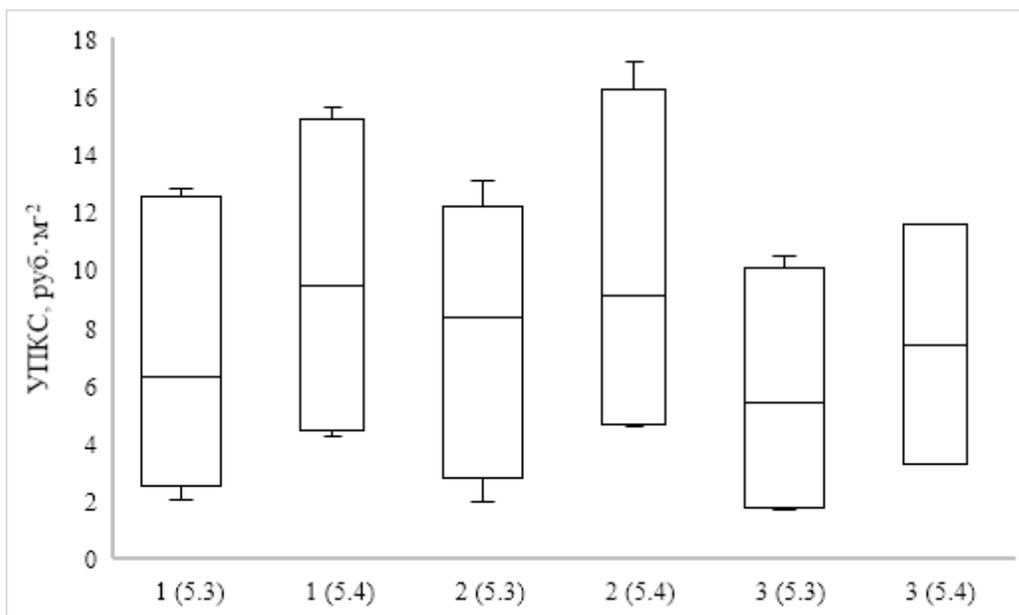


Рис. 4. Дифференциация УПКС черноземов в зависимости от агроклиматического потенциала 1 – черноземы оподзоленные; 2 – черноземы выщелоченные; 3 – черноземы обыкновенные; (5,3) – агроклиматический потенциал

Таблица 2. Влияние негативных свойств почв на величину УПКС

Почва	Негативное свойство	УПКС, руб/м ²	Снижение стоимости
Смывистость			
Черноземы оподзоленные		10.52	
Черноземы оподзоленные	Слабо смытые	9.82	7 %
Черноземы оподзоленные	Сильно смытые	2.01	81 %
Черноземы оподзоленные		11.99	
Черноземы оподзоленные	Сильно смытые	2.65	78 %
Черноземы оподзоленные		13.46	
Черноземы оподзоленные	Слабо смытые	12.8	5 %
Черноземы оподзоленные	Сильно смытые	2.81	79 %
Черноземы оподзоленные		14.27	
Черноземы оподзоленные	Слабо смытые	14	2 %
Черноземы оподзоленные	Сильно смытые	4.89	66 %
Черноземы оподзоленные		16.87	
Черноземы оподзоленные	Слабо смытые	15.64	7 %
Черноземы оподзоленные	Сильно смытые	4.25	75 %
Черноземы обыкновенные		8.94	
Черноземы обыкновенные	Слабо смытые	8.68	3 %
Черноземы обыкновенные	Сильно смытые	1.68	81 %
Черноземы обыкновенные		10.95	
Черноземы обыкновенные	Слабо смытые	10.49	4 %

Черноземы обыкновенные	Сильно смытые	2.06	81 %
Черноземы обыкновенные		10.92	
Черноземы обыкновенные	Сильно смытые	3.26	70 %
Черноземы южные		2.6	
Черноземы южные	Слабо смытые	1.99	23 %
Черноземы южные		2.6	
Дефлированность			
Черноземы южные		2.6	
Черноземы южные	Слабо дефлированные	1.99	23 %
Черноземы южные	Сильно дефлированные	0.2	92 %

Выводы

1. Размах показателей кадастровой стоимости черноземов Алтайского края начинается от 0.15 руб./м² для горных черноземов обыкновенных и доходит до 17.2 руб./м² для черноземов выщелоченных.
2. Наибольшие показатели нормативной урожайности зерновых зафиксированы для черноземов типичных, составляют 30 ц/га, что в 1.8 раз меньше аналогичных показателей для Краснодарского края. Наименьшей нормативной урожайностью зерновых обладают черноземы южные (16.9 ц/га).
3. По медианным значениям удельных показателей кадастровой стоимости в ряду черноземов Алтайского края можно выделить следующую зависимость: черноземы типичные > черноземы выщелоченные > черноземы оподзоленные > черноземы обыкновенные > черноземы южные. Зависимость связана с почвенными свойствами подтипов. Подтипам горных черноземов характерны низкие значения от 0.15 руб./м² до 0.2 руб./м², расчет показателей подтипов проводился по сенокосам и пастбищам.
4. Большой разброс показателей внутри одного подтипа черноземов обусловлен изменением агроклиматического потенциала и наличием негативных свойств. Удельные показатели кадастровой стоимости возрастают с увеличением агроклиматического потенциала для одинаковых подтипов черноземов. Негативные свойства изменяют стоимость до 81% для почв, обладающих равным агроклиматическим потенциалом.

Благодарность

Работа выполнена по теме государственного задания номер ЦИТИС: 121040800146-3 «Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления».

Литература

Государственный национальный доклад о состоянии и использовании земель Российской Федерации в 2022 году – Росреестр – Москва, 2023, 186с.

Алтайский край официальный сайт Правительства [Электронный ресурс] // URL: <https://altairegion22.ru/territory/o-krae/info/> (дата обращения: 19.02.2024).

Бурлакова Л.М., Кудрявцев А.Е., Кононцева Е.В. (2005) Деградация почв и проблемы устойчивого развития сельскохозяйственного производства в Алтайском регионе. *ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК* 4 (ч.2), 28–34.

ГОСТ Р 70229—2022. Показатели качества почв для проведения мониторинга и кадастровой оценки земель, используемых в сельскохозяйственном производстве – М.: Москва Стандартиформ, 2020 – 32с.

Почвы Алтайского края: Учеб. Пособие (1988) Л. М. Бурлакова, Л. М. Татаринцев, В. А. Рассыпнов; Алт. с.-х. ин-т. - Барнаул : Алт. СХИ, 69 с.

Справочник агроклиматического оценочного зонирования субъектов Российской Федерации (2010) Учебно-практическое пособие под ред. С.И. Носова. М.: Изд-во, «Маросейка». 208 с.

Методические указания о государственной кадастровой оценке. Утверждены Приказом Росреестра от 4 августа 2021 г №П/0336, Москва, 149с

Государственная кадастровая оценка земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации (под общей редакцией: Сапожников П.М., Носова С.И.). Москва: ООО «НИПКЦ Восход - А», 2012, 160с.

Пшеничников А.П., Носов С.И., Оглезнев А.К., Сапожников П.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2019611028. Кадастровая оценка земель сельскохозяйственного назначения, 2019.

Шехтер К.П., Сапожников П.М., (2022) Кадастровая стоимость земель агроландшафтов Краснодарского края. *Использование и охрана природных ресурсов в России*, 2, 103-109 с.

Сапожников П.М., Данилова Н.И. (2022) Кадастровая стоимость земель агроландшафтов Сибири. ЭВОЛЮЦИЯ ПОЧВ И РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ В ПОЧВОВЕДЕНИИ Международная научная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения БУРЛАКОВОЙ ЛИДИИ МАКАРОВНЫ. — РИО Алтайского ГАУ Барнаул: 179–185.

УДК 631.4

ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕМНО-КАШТАНОВЫХ ПОЧВ ПОД ЛЕСОМЕЛИОРАТИВНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ РАЗНОГО ВОЗРАСТА В АЛГИНСКОМ РАЙОНЕ АКТЮБИНСКОЙ ОБЛАСТИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Сатыбалдин М.А.^{1,2}, Яковлева Л.В.²

¹ ТОО «Казакстанский институт дендрологии и лесомелиорации», Актобе, Республика
Казакстан

satybaldin.maksat@mail.ru

² Астраханский государственный университет им. В.Н.Татищева. Астрахань, Российская
Федерация

yakovleva_lyudmi@mail.ru

CHANGES IN THE PHYSICAL PROPERTIES OF DARK CHESTNUT SOILS UNDER
FORESTRY PLANTINGS OF DIFFERENT AGE IN THE ALGINSKY DISTRICT OF
AKTOBE REGION OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Satybaldin M.A.^{1,2}, Yakovleva L.V.²

¹ LLP «Kazakhstan Institute of Dendrology and Forest Reclamation». Aktobe, Republic of
Kazakhstan

² Astrakhan State University named after. V.N. Tatishcheva. Astrakhan, Russian Federation

Annotation: The results of changes in the physical properties of chestnut soils under forests of different ages in the green zone of the city of Alga, Aktobe region of the Republic of Kazakhstan are discussed. Long-term changes in the structural state of soils, granulometric and mineral composition were revealed. It was found that with long-term forest reclamation effects, the structure of soils improves and the granulometric composition qualitatively changes.

Введение

Одной из актуальных проблем Республики Казакстан является улучшение экологической ситуации путем снижения степени деградации почвенного покрова. Значительная роль в этом вопросе отводится защитным лесным насаждениям, экологическая роль которых выражается в почвозащитных, гидрологических и других функциях. В тяжелых природных условиях аридных регионах Западно-Казакстанского региона почвенный покров испытывает не только природные воздействия как водная, ветровая эрозии, занос разбитыми песками, но и сильно страдает от агропастбищного воздействия.

С середины 50-х годов прошлого века на территории Актюбинской области начались крупномасштабные работы по воспроизводству поле-и почвозащитных, противоэрозионных и городских лесов. По данным лесоустроительных работ 2015 года лесистость области составляет 0,2%, из которых искусственные леса

составляют 63,3%. Для обеспечения оптимальной площади питания лесонасаждении активно использовался кулисный метод посадки. Схемы размещения растений и смешения пород использовались разнообразные, однако опираясь на статистику приживаемости, предпочтение отдавалось вязу перистоветвистому (*Ulmus pinnatobramosa*), доля которого составляет 51% от всех высаженных лесных культур [2].

Целью данной работы является исследование влияния лесонасаждении разного возраста на физические свойства темно-каштановых почв Алгинского района Актюбинской области.

Задачи исследования – изучить морфологические, физические и физико-химические свойства почв, выявить влияние долгосрочного лесомелиоративного воздействия на состав и свойства изучаемых почв.

Объекты и методы

В качестве объектов исследования были выбраны лесные насаждения в Илекском лесничестве КГУ «Актыбинского учреждения лесного хозяйства и животного мира». Лесные насаждения, находящиеся в непосредственной близости друг от друга, представляют собой чистые насаждения вяза перистоветвистого сплошной посадки. Почвенные разрезы были заложены на расстоянии 1,5 м от дерева в насаждениях возрастом 2 года (разрез №1), 39 лет (разрез №2), 44 года (разрез №3), 58 лет (разрез №4) и на целине (разрез №5) на расстоянии 470 метров от лесонасаждения (рис.1). Основные разрезы на пробных площадях были заложены в сентябре 2023 года.



Рис. 1. Расположение почвенных разрезов в Алгинском районе

Почвенные образцы были отобраны по общепринятым стандартам и методикам отбора почвенных проб. Структурное состояние почв оценивали «сухим» просеиванием по методу Н.И. Саввинова. Почвы изучались с помощью полевого,

морфологического и диагностического методов. Для исследования физико-химических свойств, гранулометрического состава, химического анализа водной вытяжки и содержания гумуса использовались общепринятые методики [1]. Испытания проводились в лаборатории ТОО «АГЛ-Актобе» в городе Актобе Республики Казахстан.

Результаты и обсуждение

Исследуемые участки находятся на степных темно-каштановых солонцеватых малогумусных суглинистых и глинистых почвах (рис.2). Почвообразующие породы представлены тяжелосуглинистыми и глинистыми отложениями.

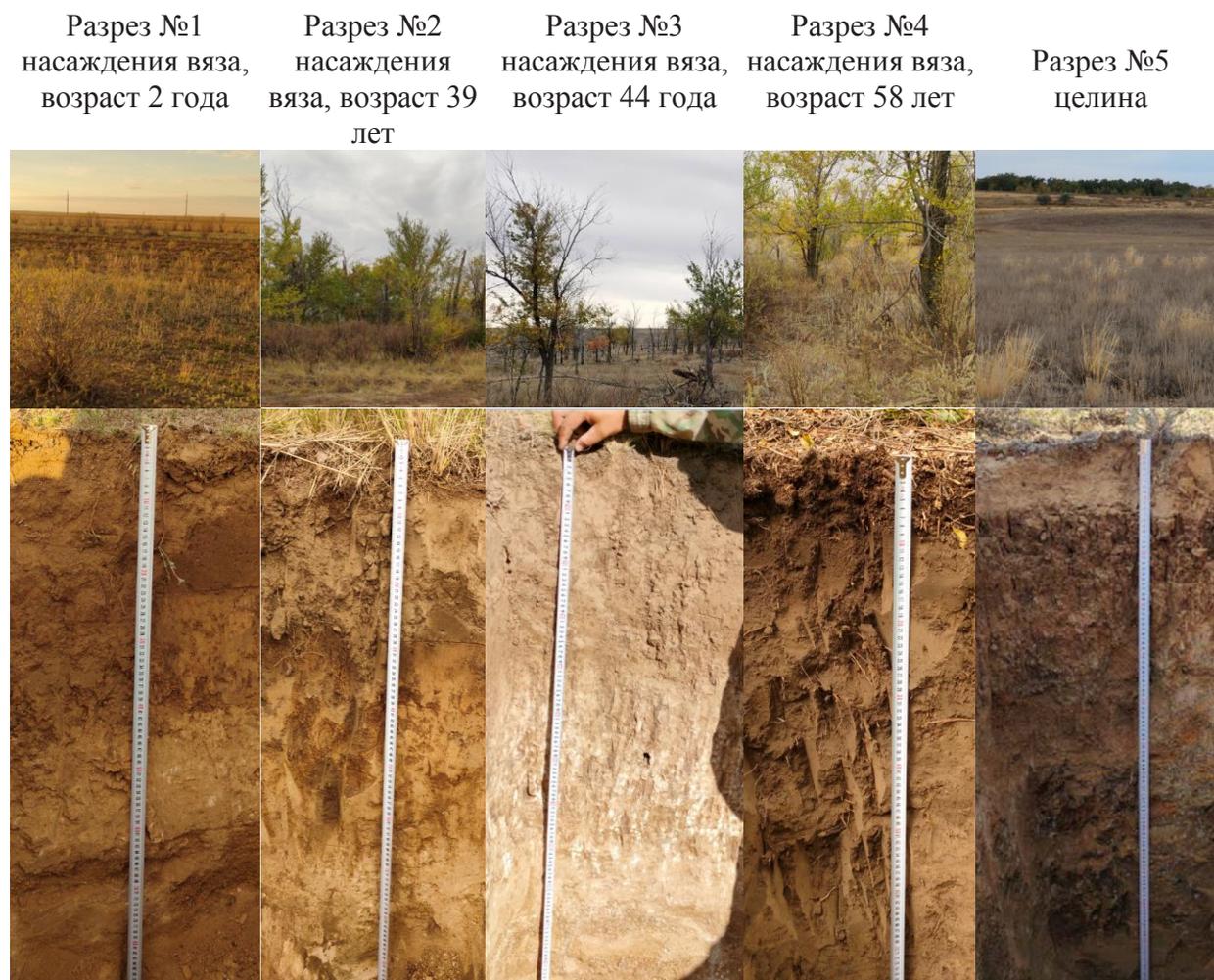


Рис.2. Снимки основных разрезов на пробных площадях

Насаждения вяза перистоветвистого имеют следующие характеристики: пробная площадь (ПП) №1 - возраст насаждения 2 года, посадка кулисным методом схема размещения кулис 15×15 метров, схема посадки 3×1 метр, приживаемость 60%; ПП №2 – возраст 39 лет, сплошная посадка схемой размещения 6×1 метр, полнота 0,6 суховершинность 20%; ПП №3 - возраст 44 года, сплошная посадка схемой размещения 6×1 метр, полнота 0,4 суховершинность 60-70%, сухостой 30%; ПП №4 - возраст 58 лет, сплошная посадка схемой размещения 6×1 метр, полнота 0,4 суховершинность 50-60%, сухостой 20%; целина – пастбищные угодья.

Растительный покров исследуемого района представлен разнотравно-типчаково-ковыльной растительностью с примесью полыней. Среди посадок встречаются самосевы клена ясенелистного, карагана, смородины золотистой.

Непосредственно на степень устойчивости к деградационным процессам оказывают влияние такие свойства почв как гранулометрический состав, содержание гумуса, структурное состояние, связность агрегатов, противодефляционная и противоэрозионная стойкость. Изменение условий почвообразования под длительным влиянием лесных насаждений сказывается на данных показателях почв. Оценить влияние лесных насаждений на физические свойства почв можно изучив комплексно.

Содержание илистой фракции, которая играет важную роль в структурообразующих процессах, достаточно велико от 21,6 до 81,7 % (таблица 1). Как показано исследованиями гранулометрический состав почв по всем разрезам утяжеляется с понижением почвенных горизонтов. Гранулометрический состав почв под лесными культурами заметно легче чем на целине (разрез №5) и под культурами возрастом 2 года (разрез №1). Наличие большого количества тонкодисперсных частиц оказывает цементирующий эффект и препятствует глубокому впитыванию атмосферных осадков, являясь своего рода водупором. В этой связи важным показателем является порозность (пористость), снижение показателя которого сопровождается уплотнением почвенного покрова. Самый низкий показатель порозности, а значит сильно уплотнённая почва на целине.

Еще одной специфической чертой степного почвообразования является хорошо выраженная структурированность почв. Общая оценка коэффициента структурности удовлетворительная и резко понижается с горизонта А к горизонту АВ. Самая высокая структурность прослеживается в разрезе №1, это связано с недавней распашкой участка для посадки лесных культур. Низкие показатели структурности отмечаются в почвах на целине. Общая низкая структурированность почвенного покрова уменьшает водоустойчивость и дисперсность агрегатов, снижает противоэрозионную стойкость.

Гигроскопическая влага под лесными насаждениями высокая в горизонте А и снижается с понижением почвенных горизонтов. Данное явление связано десукцией почвенной влаги древостоем. В почвах на целине прямо противоположная ситуация,

влага увеличивается более чем в 2 раза к горизонту С. Более глубокие исследования почвенной влаги под насаждениями аридных территории были произведены в Джаныбекском стационаре под руководством А.А. Роде. По итогам исследования было установлено, что при закладке лесных культур нарушается равновесие состояния воды в пресной линзе и с течением времени пресная линза исчерпывается [3]. Схожие результаты были получены при исследовании почвенного покрова под целиной, пашней и лесными культурами на светло-каштановых почвах Уилского района Актюбинской области Республики Казахстан [4].

Таблица 1. Некоторые физические свойства исследованных почв

Горизонт, глубина, см	Содержание илстых частиц, %	Плотность сложения, г/см ³	Порозность, %	Коэффициент структурности	Гигроскопическая влага, %
Темно-каштановая солонцеватая маломощная суглинистая (разрез №1)					
А 0-22	40,4	1,64	36,6	2,65	6,98
АВ 22-39	50,7	-	-	3,09	3,4
В 39-63	45,0	-	-	1,36	4,78
С 63-88	21,6	-	-	-	2,85
Темно-каштановая солонцеватая маломощная суглинистая (разрез №2)					
А 0-29	37,0	1,65	43,5	1,13	6,18
АВ 29-39	44,9	-	-	0,71	7,02
В 39-69	33,9	-	-	0,74	4,44
С 69-110	48,3	-	-	0,55	4,42
Темно-каштановая солонцеватая маломощная суглинистая (разрез №3)					
А 0-30	36,8	1,35	23,8	1,09	10,6
АВ 30-40	59,9	-	-	0,55	5,93
В 40-88	61,6	-	-	0,55	7,91
С 88-110	65,9	-	-	-	7,93
Темно-каштановая солонцеватая маломощная суглинистая (разрез №4)					
А 0-40	30,6	1,55	20,1	1,18	4,97
АВ 40-55	57,7	-	-	0,77	4,23
В 55-100	64,4	-	-	1,07	6,55
С 100-140	64,6	-	-	1,16	5,79
Темно-каштановая солонцеватая маломощная суглинистая (разрез №5)					
А 0-12	52,0	1,33	17,7	1,24	5,9
АВ 12-45	76,9	-	-	0,02	6,59
В 45-104	75,0	-	-	0,91	8,56
С 104-120	81,7	-	-	0,89	12,95

Засушливость климата, определяет низкую гумусированность почвенного покрова (таблица 2), формирования которых лучше идет в условиях хорошего

атмосферного увлажнения. Недостаточный запас влаги способствует замедлению аккумуляции гумуса.

Исследования проводились на содержание гумуса в горизонтах А и АВ. Показатель содержания гумуса в разрезе №1 выше на 0,14% в горизонте АВ по сравнению с горизонтом А. Это связано со вспашкой целинных земель с оборотом пласта для посадки лесных культур. Подготовка почвы производится в течение 2-х лет на глубину до 60 см. По остальным пробным площадям наблюдается небольшая тенденция к увеличению содержания гумуса с увеличением возраста насаждений, так же содержание гумуса в почвах под насаждениями на 0,04-0,14% выше, чем в почвах на целине.

Таблица 2. Химические и физико-химические свойства исследованных почв

Горизонт, глубина, см	Гумус, %	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	Сумма солей, %	Поглощенные катионы, мг-экв/100 г почвы		
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺
Темно-каштановая солонцеватая маломощная суглинистая (разрез №1)						
А 0-22	0,33	0,46	0,035	0,125	0,125	0,387
АВ 22-39	0,47	0,35	0,048	0,125	0,000	0,714
В 39-63	-	0,53	0,054	0,250	0,123	0,644
С 63-88	-	0,49	0,063	0,250	0,000	0,902
Темно-каштановая солонцеватая маломощная суглинистая (разрез №2)						
А 0-29	0,54	0,44	0,047	0,750	0,125	0,910
АВ 29-39	0,38	0,88	0,063	0,250	0,000	0,910
В 39-69	-	1,46	0,787	2,000	1,000	9,705
С 69-110	-	0,11	0,040	0,250	0,000	0,447
Темно-каштановая солонцеватая маломощная суглинистая (разрез №3)						
А 0-30	0,61	0,15	0,032	0,125	0,000	0,437
АВ 30-40	0,53	0,29	0,019	0,125	0,000	0,210
В 40-88	-	0,77	0,037	0,125	0,000	0,512
С 88-110	-	1,47	0,026	0,125	0,000	0,335
Темно-каштановая солонцеватая маломощная суглинистая (разрез №4)						
А 0-40	0,55	0,91	0,029	0,375	0,125	0,037
АВ 40-55	0,39	0,77	0,037	0,125	0,000	0,512
В 55-100	-	0,73	0,036	0,125	0,000	0,496
С 100-140	-	0,64	0,069	0,125	0,000	1,097
Темно-каштановая солонцеватая маломощная суглинистая (разрез №5)						
А 0-12	0,50	1,54	0,042	0,500	0,250	0,037
АВ 12-45	0,35	0,64	0,053	0,125	0,000	0,519
В 45-104	-	0,88	0,620	3,750	1,000	5,648
С 104-120	-	3,25	0,063	0,125	0,125	0,927

Засоление почвы и накопление их в определенных горизонтах обуславливается водопропускной способностью и глубиной промачивания. По всем пробным участкам накопление труднорастворимых солей отмечается в горизонтах АВ и В, тип засоления: сульфатное ($D_{sol} < 1,0$) и хлоридно-сульфатное ($D_{sol} > 1,0$); степень засоления: незасоленные ($D_{sol} < 0,5$), слабозасоленные ($0,5 \leq D_{sol} < 1,0$), средnezасоленные ($1,0 \leq D_{sol} < 3,0$) и сильнозасоленные ($3,0 \leq D_{sol} \leq 8,0$).

Одним из факторов структурообразования и устойчивости почв к водной и ветровой эрозиям является состав поглощённых оснований. Содержание натрия в ППК придает почве глыбистую структуру и склонность к образованию корки на поверхности почвы. Это увеличивает устойчивость почвы к ветровой эрозии. Однако такая почва весьма неустойчива к водной эрозии. Устойчивость почвенного покрова к водной эрозии увеличивается при доминировании в ППК кальция и магния. На исследуемых пробных площадях в ППК доминирует натрий, концентрация которого увеличивается к нижележащим горизонтам. Доля кальция и магния от суммы поглощенных катионов составляет 21,2 – 46,5%.

Современные геоинформационные системы дают возможность обзорно представить глобальные изменения территории в довольно большом отрезке временного пространства.

Так, сравнивая ГИС снимки 2022 года изучаемой территории со снимками 1975 года можно увидеть, что растительный покров увеличился на 25-30% (рис.3). Снимок растительного покрова пробной площади №1 не производили, так как срок оказания лесомелиоративного воздействия был незначительный.

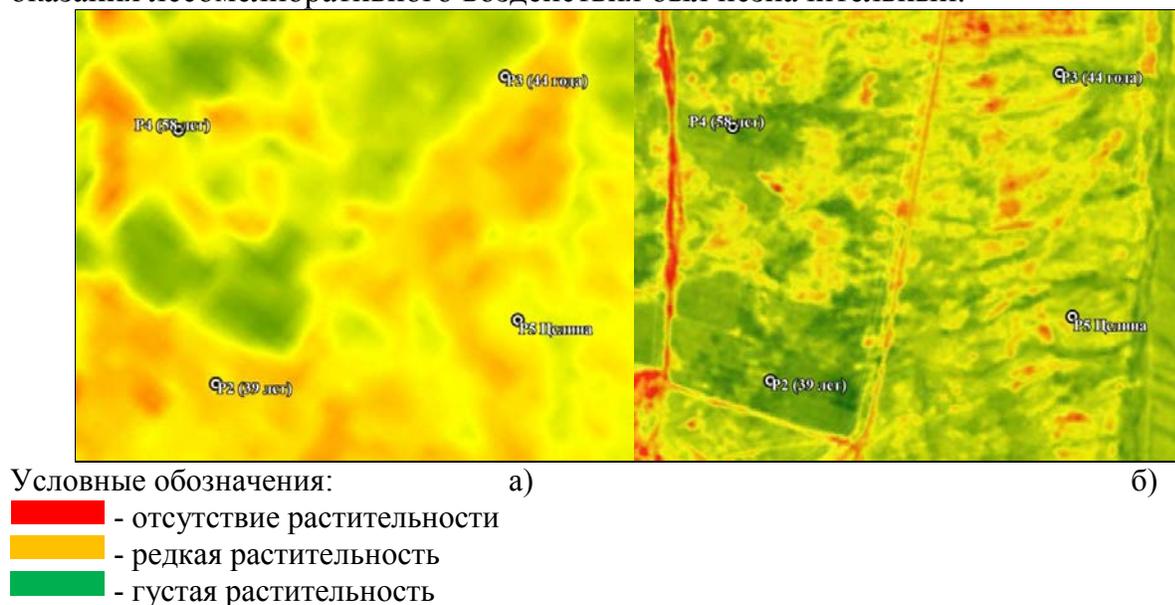


Рис. 3. Сравнение ГИС снимков растительности. а) ГИС снимок 1975 года, б) ГИС снимок 2022 года

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Длительное лесомелиоративное воздействие способствовало увеличению гумусово-аккумулятивного горизонта и содержания гумуса в почве.
2. Отмечается улучшение гранулометрического состава и пористости почв на верхних горизонтах, однако структурное состояние остается такой же как на целине.
3. Запас влаги в насаждениях уменьшается к нижележащим горизонтам, тогда как на целине наоборот увеличивается.
4. Способствуя более глубокому промачиванию почвы, аккумуляция солей в насаждениях происходит на более глубоких горизонтах по сравнению с целиной.
5. Лесная среда способствует большему и качественному покрытию почвы растительностью.

В целом отмечая положительное влияние лесных насаждений на процесс почвообразования необходимо учитывать схему размещения и схему смешения пород (породный состав) для достижения оптимальной площади питания древесно-кустарниковых пород и травостоя. Своевременно проводить рубки ухода и прореживания. Как было отмечено выше лесные насаждения, особенно в загущенных посадках, вызывают дефицит влаги, что приводит к торможению всех положительных всех положительных почвообразовательных процессов.

Литература

- Arinushkina E.V. (1970) Soil Chemical Analysis Guide. Moscow University Publishing House.
- RSGE «Kazakh forest management enterprise». Basic provisions for organizing and maintaining forestry in the Aktobe region. Almaty 2015.
- Sapanov M.K. (2016) Results of soil moisture studies at the Dzhanibek station. *Bulletin of the Soil Institute named after V.V. Dokuchaev*, 8-9
- Satybaldin M. A., Yakovleva L.V. (2022) Impact of forest melioration on the soil properties of arid territories International scientific and practical conference. In: International scientific and practical conference «Caspian and global challenges» 900:129-132

УДК 631.425; 631.432.2; 631.435

ИЗОТЕРМЫ СОРБЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА И ПЛОЩАДЬ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ПОЧВ В ОПЫТЕ С УДАЛЕНИЕМ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

Симонова Ю.В.

Кафедра почвоведения и экологии почв, Институт наук о Земле,
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская
Федерация
uvsim@yandex.ru

WATER VAPOR SORPTION ISOTHERMS AND SPECIFIC SURFACE AREA OF
NATURAL AND ANTHROPOGENIC SOILS IN THE ORGANIC MATTER REMOVAL
EXPERIMENT

Simonova J.V.

Department of Soil Science and Soil Ecology, Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State
University,
Saint Petersburg, Russia

Annotation: The contribution of organic matter to hydrosorption properties was assessed by recording adsorption-desorption isotherms in the hygroscopic water range. Treatment of humus horizons samples using hydrogen peroxide led to a decrease in the water sorption capacity, a decrease in the specific soil surface area, and hysteresis change.

Введение

Изучение экологических функций почв в условиях нарастающего антропогенного давления является актуальной задачей. Недостаточно освещенной и важной остается проблема деградации сорбционной функции техногенно преобразованных почв.

Одной из главных характеристик твердой фазы почвы, определяющей сорбционную функцию почвы, является содержание органического вещества. По сравнению с минеральной составляющей вклад органического вещества в сорбционную функцию представляется даже более важным, поскольку его содержание в почве можно регулировать.

Целью настоящего исследования было определить влияние органического вещества на проявление сорбционной функции почвы через ее гидросорбционные свойства и площадь удельной поверхности. Сорбция влаги изучалась с помощью изотерм адсорбции-десорбции в диапазоне относительных давлений, соответствующем гигроскопической области влаги.

Оценка вклада органического вещества в гидросорбционные свойства выполнялась путем сравнения почв с разным содержанием органического вещества, а также сопоставления их с почвами, в которых органическое вещество было удалено в лабораторном опыте.

Объекты и методы

Объекты исследования

В эксперименте участвовали как почвы естественных биогеоценозов, так и испытывающие антропогенную нагрузку (почвы агроценозов и городские почвы). Всего было изучено 11 образцов гумусовых горизонтов 6 почв из двух природных зон (южно-таежной подзоны и лесостепи): 1. Дерново-подзолистая урбистратифицированная почва на ленточных глинах, парк г. Санкт-Петербурга; 2. Урбиквизем, газон в зоне инженерно-транспортной инфраструктуры г. Санкт-Петербурга; 3. Дерново-элювиально-метаморфическая глееватая почва на ленточных глинах, Лисинский заказник, Ленинградская обл.; 4. Агрозем темный глееватый на ленточных глинах, участок индивидуальной жилой застройки в пос. Лисино-корпус, Ленинградская обл. Используется под огород более 40 лет. Культура земледелия предусматривает внесение органических и минеральных удобрений; 5. Серая метаморфическая почва на бурых глинах, заповедник «Белогорье», Белгородская обл.; 6. Чернозем глинисто-иллювиальный на бурых глинах, заповедник «Белогорье», Белгородская обл.

Методы исследований

Удаление органического вещества выполняли «мягким» способом, предусматривающим многократную обработку почвы перекисью водорода с последующим нагреванием до исчезновения реакции на перекись.

Водоудерживающая способность в области сорбционной влаги оценивалась на основании данных о равновесной влажности в образцах гумусовых горизонтов вышеуказанных почв и в них же, но после обработки перекисью (модифицированные образцы).

Влажность определялась над насыщенными растворами солей с относительным давлением водяного пара P/P_0 : 0.07; 0.22; 0.33; 0.62; 0.75; 0.86; 0.98. Бюксы с почвой выдерживались последовательно в каждом эксикаторе до достижения адсорбционного равновесия от наибольшего значения P/P_0 к наименьшему для получения экспериментальных точек десорбционной ветви сорбционной кривой и в обратном порядке для построения адсорбционной ветви. Величину гидросорбционного гистерезиса оценивали исходя из различий равновесных влажностей в циклах иссушения-увлажнения. Измерения выполнялись в трехкратной повторности.

Для расчета полной, внутренней и внешней удельной поверхности определялись величины W_m и W_e – влажности, соответствующие состоянию

образования сплошной пленки по всей поверхности частиц и внешнего монослоя воды соответственно (Шейн, 2005). Величина влажности полного монослоя W_m вычислялись с использованием уравнения БЭТ в области давлений паров воды от 0.05 до 0.35, где уравнение сохраняет свою линейность. Величина внешнего монослоя W_e вычислялась по уравнению Фаррера, справедливого в диапазоне относительных давлений 0.4–0.8. Величину площади полной удельной поверхности вычисляли по уравнению БЭТ, внешней – по уравнению Фаррера, внутренней – по разности площадей полной и внешней удельной поверхности.

Гранулометрический состав почв был определен пипет-методом по Качинскому с пирофосфатной обработкой. Содержание органического вещества (Сорг) определялось методом Тюрина с последующим контролем остаточного содержания Сорг в модифицированных образцах.

Результаты и обсуждение

Рассмотренные разрезы дерново-подзолистой урбистратифицированной почвы и урбиквазизема имеют общую для почв мегаполисов тенденцию изменения исходного строения профилей за счет привноса прогумусированного материала на поверхность и появления урбистратифицированных горизонтов, содержащих артефакты.

Содержание Сорг в городских почвах (табл. 1) превышает его содержание в почвах зонального ряда, что связано с поступлением в поверхностный горизонт органических поллютантов (Васенев, Прокофьева, Макаров, 2013). В составе городской пыли, переносимой воздушными потоками, содержатся частицы угля, графита, сажи и другие продукты неполного сгорания топлива (Водяницкий, 2015).

В урбиквазимеме наблюдаются не характерные для зоны кислых почв повышенные значения $pH_{водн}$ и $pH_{сол}$ (табл. 1). Изменение реакции среды почв урбанизированных территорий в сторону подщелачивания определяется загрязнением противогололедными реагентами, такими как хлористый натрий, а также значительным вкладом в состав городской пыли цементного и других строительных производств.

Поскольку рассматриваемые в настоящей работе гумусовые горизонты городских почв являются насыпными, то их гранулометрический не связан с почвообразующей породой, которая здесь представлена ленточными глинами. Легкосуглинистый гранулометрический состав урбиквазизема и дерново-подзолистой урбистратифицированной почвы отражает общую тенденцию облегчения гранулометрического состава городских почв.

Таблица 1. Базовые физические и физико-химические показатели почв

Горизонт	Глубина, см	Физ. глина, %	Ил, %	рН		Сорг, %
				водн	сол	
Дерново-подзолистая урбистратифицированная почва на ленточных глинах						
AYur1	5–16	28	14	5.3	4.6	2.8
Урбиквазизем						
AYur1	0–5	30	17	6.9	6.4	3.6
AYur2	5–10	28	14	7.2	6.6	3.4
Дерново-элювиально-метаморфическая глееватая почва на ленточных глинах						
AEL	0–5	71	5	4.2	3.9	2.6
Агрозем темный глееватый на ленточных глинах						
P1	0–24	37	18	5.5	5.1	5.8
Серая метаморфическая почва на бурых глинах						
AY1	0–15	51	18	6.7	6.2	4.8
AY2	15–23	53	18	6.4	6.0	3.5
AY3	23–40	60	28	6.6	6.0	2.6
AYe4	40–55	63	32	6.7	6.1	1.8
Чернозем глинисто-иллювиальный на бурых глинах						
AU1	0–28	76	30	7.0	6.2	3.6
AU2	28–64	59	30	6.8	6.1	2.5

Рассмотренные почвы, развитые на ленточных глинах Ленинградской области, наоборот, наследуют свой тяжелый гранулометрический состав от почвообразующей породы. Однако, при сравнении гумусовых горизонтов дерново-элювиально-метаморфической почвы под лесной растительностью и агрозема темного заметны отличия в соотношении физической глины и ила (табл. 1). Так, по сравнению с гор. AEL в пахотном гор. P1 наблюдается более высокое содержание илстых частиц, что объясняется ослаблением их выноса за счет агрогенного преобразования.

Содержание Сорг в верхних гумусово-аккумулятивных горизонтах всех изученных почв находилось в интервале от 2.6 до 5.8%. Причем самое высокое содержание было обнаружено в пахотном горизонте агрозема. Оно оказалось даже

выше, чем в почвах лесостепи (табл. 1), что указывает на внесение высоких доз органических удобрений в пахотную почву.

При сравнении серой метаморфической почвы и чернозема глинисто-иллювиального обращает на себя внимание несколько более тяжелый гранулометрический состав последнего, но это различие выявлено только для верхних гумусовых горизонтов, ниже по профилю гранулометрический состав обеих почв выравнивается.

В отношении Сорг более высоким содержанием выделяется только горизонт АУ (0–15 см) серой метаморфической почвы, тогда как в остальной части профиля содержание Сорг в обеих почвах близкое (табл. 1).

При сопоставлении кривых сорбции исходных образцов гумусовых горизонтов городских почв (кривые 1, 3, 5 на рис. 1) и почв Ленинградской области (кривые 7, 9 на рис. 1) заметно сходство характера их поведения и формы. Однако, изотермы адсорбции-десорбции дерново-элювиально-метаморфической почвы и агрозема (кривые 7 и 9 на рис. 1) демонстрируют более высокую влагоудерживающую способность по сравнению с городскими почвами (кривые 1, 3, 5 на рис. 1), что обусловлено их более тяжелым гранулометрическим составом (табл. 1). При этом следует учитывать, что лучшая влагоудерживающая способность почв на ленточных глинах имеет недостаток в виде низкой водопроницаемости, которая приводит к застою атмосферной влаги в профиле и оглеению.

Существенно более высоким местоположением в координатах осей P/P_0 – W_p отличалась кривая окультуренной почвы (кривая 9, рис. 1), что можно объяснить как более высоким содержанием ила, так и высоким содержанием Сорг (табл. 1).

Горизонт P1 (кривая 9, рис. 1) характеризовался резким увеличением влажности в интервале относительных давлений $P/P_0 > 0.6$, ассоциирующимся с началом капиллярной конденсации, и особенно в точке, соответствующей максимальной гигроскопической влажности. Тяжелый илисто-пылеватый состав и особенности микростроения ленточных глин определяют исходно высокий уровень адсорбированной влаги развитых на них почв. Однако процессы оструктурирования в гумусово-аккумулятивных горизонтах почвы за счет внесения органических и минеральных удобрений нивелируют неблагоприятные особенности водного режима, наследуемого от почвообразующей породы. Так, пахотный горизонт агрозема и гумусовый горизонт целинной почвы имеют близкие значения равновесных влажностей в диапазоне формирования мономолекулярного слоя воды $0 < P/P_0 < 0.4$, то есть наиболее прочно связанной влаги, тогда как в области полимолекулярной сорбции $0.4 < P/P_0 < 0.6$ и в большей мере в области начала капиллярной конденсации $P/P_0 > 0.6$ различия между почвами выражены сильнее. В пахотном горизонте в этом интервале относительных давлений происходит увеличение доли пленочной влаги, имеющей важное экологическое значение для функционирования почвенной нано- и микрофауны.

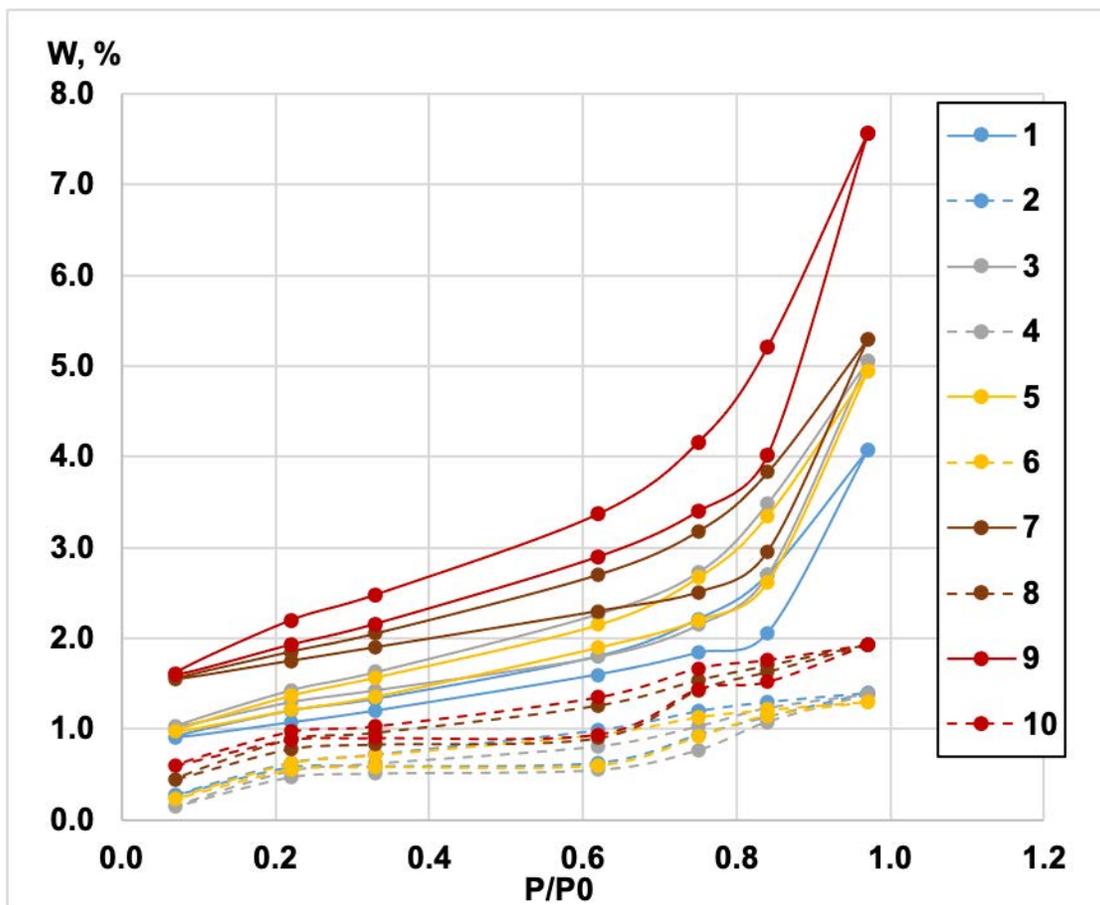


Рис. 1. Изотермы адсорбции и десорбции паров воды (нижняя ветвь – кривая иссушения; верхняя – кривая увлажнения): 1. Дерново-подзолистая урбистратифицированная на ленточных глинах, гор. АУur1 (5–16 см); 2. Та же почва, обработанная перекисью; 3. Урбиквазизем, гор. АУur1 (0–5 см); 4. Та же почва, обработанная перекисью; 5. Урбиквазизем, гор. АУur2 (5–10 см); 6. Та же почва, обработанная перекисью; 7. Дерново-элювиально-метаморфическая глееватая на ленточных глинах, гор. АЕL (0–5 см); 8. Та же почва, обработанная перекисью; 9. Агрозем темный глееватый на ленточных глинах, гор. P1 (0–24 см); 10. Та же почва, обработанная перекисью

Гистерезис в горизонте P1 агрозема во всем диапазоне гигроскопической влаги выражен сильнее по сравнению с горизонтом АЕL почвы под лесом (рис. 1). Вероятней всего, на усиление гетерогенности поверхности частиц и возрастание гистерезиса в пахотном горизонте агрозема может влиять не только более высокое содержание Сорг, но и повышение гуматности и глубины гумификации. Эти показатели, предположительно, влияют на перераспределение гидрофильных и гидрофобных компонентов органического вещества в пользу последних (Шваров, Коренева, 2008).

Обработка перекисью водорода образцов гумусовых горизонтов существенно (в 3–6 раз) снизила содержание в них Сорг, но не привела к его полному удалению. Содержание Сорг в модифицированных образцах сохранилось на уровне 0.4–1.3%. Минимальное значение остаточного Сорг было отмечено в дерново-элювиально-метаморфической почве, максимальное – в урбиквализеме. Неодинаковая относительная убыль Сорг объясняется разным качественным составом органического вещества и различиями его устойчивости к окислению. Например, в черноземе глинисто-иллювиальном высокое остаточное содержание Сорг (1.1%) обусловлено более глубокой степенью гумификации. В городских же почвах причиной более высокого остаточного содержания Сорг (1.1–1.3%) является, предположительно, поступление трудно окисляемых соединений техногенного углерода на поверхность почвы.

Циклические кривые адсорбции-десорбции модифицированных образцов по сравнению с исходными показали значительное смещение в область меньших равновесных влажностей (изображены на рис. 1 пунктиром), что говорит о резком уменьшении водоудерживающей способности почв в связи с потерей органического вещества. Одновременно обработка перекисью привела к нивелированию различий сорбционных кривых городских почв между собой (кривые 2, 4, 6 на рис. 1) и кривых дерново-элювиально-метаморфической почвы и агрозема темного (кривые 8, 10 на рис. 1), несмотря на их некоторые различия в гранулометрическом составе.

Удаление органического вещества сказалось на проявлении гидросорбционного гистерезиса. Отмечено его снижение во всех модифицированных образцах и во всем рассмотренном диапазоне гигроскопической области влаги.

Сорбционные кривые образцов гумусовых горизонтов лесостепных почв – серой метаморфической почвы и чернозема глинисто-иллювиального имеют близкое расположение в координатах осей P/P_0 – W_p (рис. 2). Такая форма изотерм ассоциируется с капиллярной конденсацией в мезопорах (Грег, Синг, 1984). Изотермы сорбции водяного пара образцов, отобранных в пределах гумусово-аккумулятивной части профиля серой метаморфической почвы (кривые 1, 3, 5, 7), практически совпадают, то есть их смещения друг относительно друга находятся в пределах ошибки метода. Основные различия кривых проявляются в области начала капиллярной конденсации $P/P_0 > 0.6$. По всей видимости, вариации по содержанию Сорг в пределах прогумусированной толщи отдельного профиля – от 4.8% в АУ1 до 1.8% в АУе4 (табл. 1) имеют наибольшее значение именно для этой области влажности.

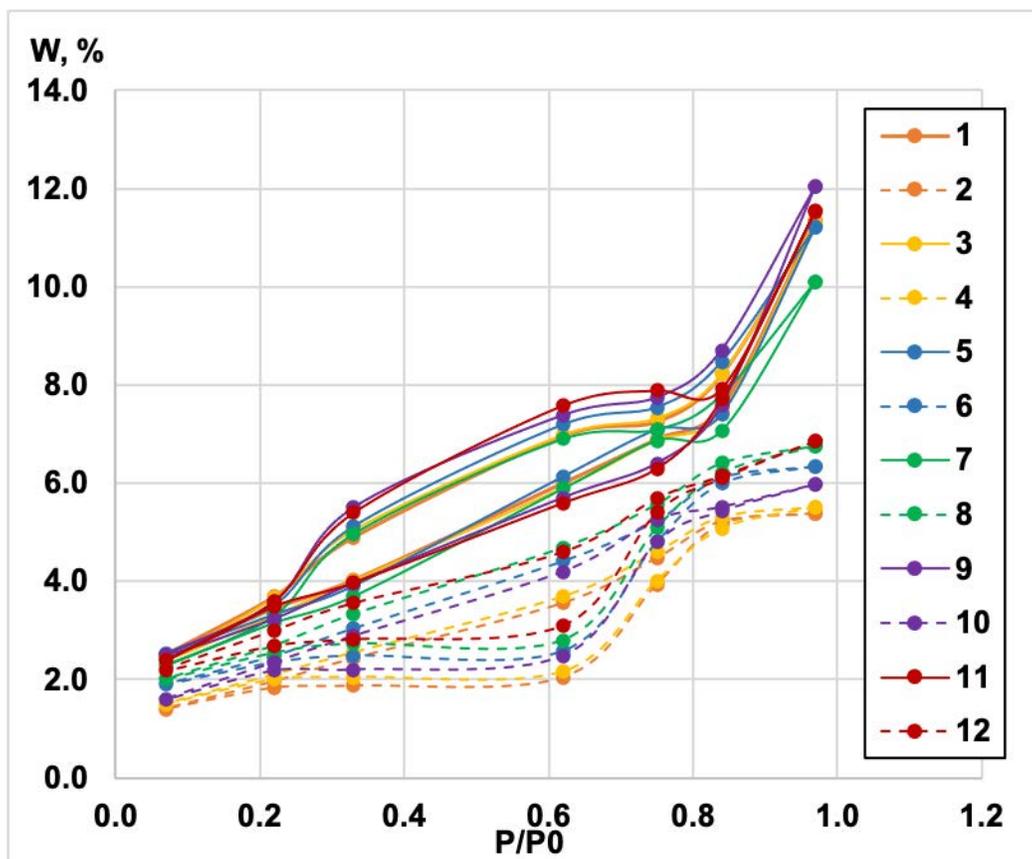


Рис. 2. Изотермы адсорбции и десорбции паров воды (нижняя ветвь – кривая иссушения; верхняя – кривая увлажнения) образцов серой метаморфической почвы на бурых глинах (1. гор. АУ1 (0–15 см); 2. Та же почва, обработанная перекисью; 3. гор. АУ2 (15–23 см); 4. Та же почва, обработанная перекисью; 5. гор. АУ3 (23–40 см); 6. Та же почва, обработанная перекисью; 7. гор. АУе4 (40–55 см); 8. Та же почва, обработанная перекисью) и чернозема глинисто-иллювиального (9. гор. АУ1 (0–28 см); 10. Та же почва, обработанная перекисью; 11. гор. АУ2 (28–64 см); 12. Та же почва, обработанная перекисью)

Характер сорбционных кривых обеих почв демонстрирует резкое возрастание гидросорбционной способности на участке кривой, связанной с началом капиллярной конденсации. Графически это проявляется в увеличении крутизны изотермы в области давлений 0.8–1.

В целом по сравнению с почвами лесной зоны рассмотренные почвы лесостепи имели лучшую способность к влагоудержанию во всей гигроскопической области влажности.

В окисленных перекисью образцах серой метаморфической почвы и чернозема глинисто-иллювиального наблюдались существенные изменения относительно исходных образцов. Сорбционные кривые приобрели пологий характер (кривые 2, 4,

6, 8, 10, 12 на рис. 2), что свидетельствует о снижении гидросорбционной способности почв, перестройке порового пространства, изменении качества поверхности, геометрической неоднородности и энергии взаимодействия на границе адсорбент-адсорбат.

Анализ данных о площади удельной поверхности почв показал, что ее величина в почвах лесостепи, сформированных на бурых глинах (гистограммы 6–11 на рис. 3а), намного выше, чем в почвах лесной зоны на ленточных глинах (гистограммы 4, 5 на рис. 3а) и в техногенно преобразованных городских почвах (гистограммы 1–3 на рис. 3а). Площадь удельной поверхности серой метаморфической почвы и чернозема глинисто-иллювиального составила в среднем 100 м²/г. В почвах Ленинградской области ее величина составила 45 м²/г у дерново-элювиально-метаморфической почвы и 52 м²/г у агрозема темного. В насыпных горизонтах урбистратифицированных городских почв величина площади удельной поверхности оказалась минимальной – 29 м²/г у дерново-подзолистой почвы в парковой зоне и 33–35 м²/г у урбиквазизема в зоне инженерно-транспортной инфраструктуры.

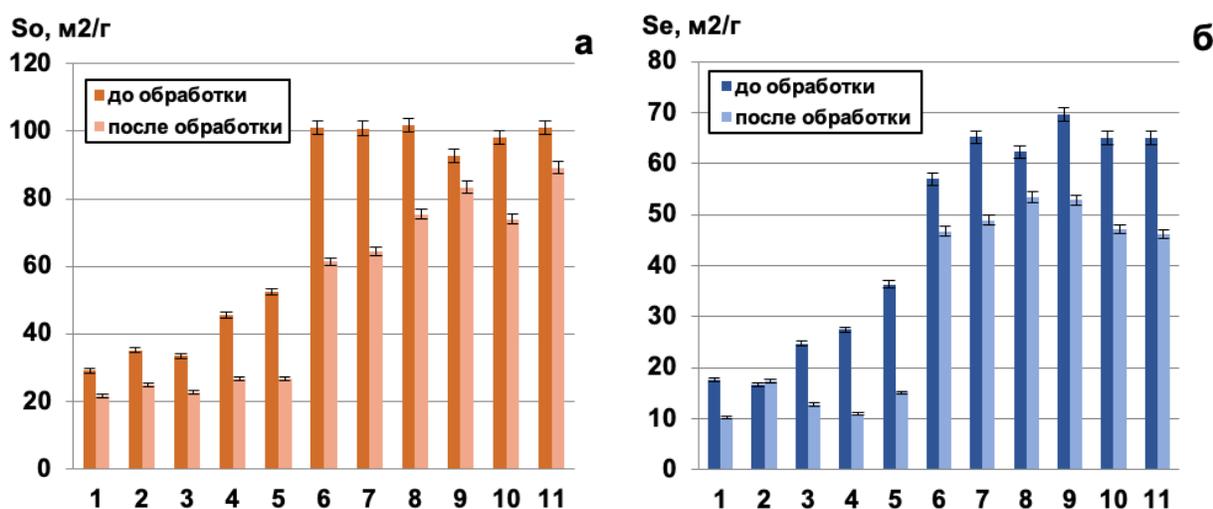


Рис. 3. Изменение площади удельной поверхности гумусовых горизонтов почв в результате обработки перекисью водорода: а) полной по БЭТ; б) внешней по Фарреру. Номера на оси X: 1. Дерново-подзолистая урбистратифицированная на ленточных глинах, гор. АУur1 (5–16 см); 2. Урбиквазизем, гор. АУur1 (0–5 см); 3. Та же, гор. АУur2 (5–10 см); 4. Дерново-элювиально-метаморфическая глееватая на ленточных глинах, гор. АЕL (0–5 см); 5. Агрозем темный глееватый на ленточных глинах, гор. Р1 (0–24 см); 6. Серая метаморфическая на бурых глинах, гор. АУ1 (0–15 см); 7. Та же, гор. АУ2 (15–23 см); 8. Та же, гор. АУ3 (23–40 см); 9. Та же, гор. АУе4 (40–55 см); 10. Чернозем глинисто-иллювиальный, гор. АU1 (0–28 см); 11. Та же, гор. АU2 (28–64 см)

Наиболее низким вкладом внешней удельной поверхности в общую площадь характеризуются почвы, сформированные на ленточных глинах (гистограммы 4, 5 на рис. 3б), что, вероятно, отражает особенности микростроения ленточных глин: высокую степень дисперсности, но низкую пористость. Так, например, увеличение общей удельной поверхности за счет прироста внешней в горизонте P1 агрозема (гистограмма 5 на рис. 3а и 3б) по сравнению с естественной почвой на ленточных глинах под лесом (гистограмма 4 на рис. 3а и 3б) может быть объяснено изменением качества поверхности частиц в отношении сорбции воды вследствие улучшения микроагрегатного состояния.

После обработки перекисью водорода отмечено статистически значимое снижение величины площади удельной поверхности во всех образцах гумусовых горизонтов (рис. 3а). Неравноценное снижение удельной поверхности в разных образцах (в 1.1–2 раза) связано, по-видимому, с разной устойчивостью органического вещества к окислению перекисью водорода, что определяется различиями в качественном составе органического вещества. Следует отметить, что во всех случаях, кроме одного, это снижение было вызвано снижением площади внешней поверхности (рис. 3б). Площадь внешней поверхности модифицированных образцов уменьшилась относительно исходных в 1.2–2.5 раза.

Выводы

1. Удаление органического вещества с помощью перекиси водорода в образцах гумусовых горизонтов привело к снижению сорбционной способности почв по отношению к воде во всем диапазоне гигроскопической влаги и особенно в области полимолекулярной сорбции и начала капиллярной конденсации.
2. Удаление органического вещества привело к изменению гистерезисных явлений, что указывает на изменение геометрической неоднородности и энергии взаимодействия на границе адсорбент-адсорбат.
3. Удаление органического вещества привело к уменьшению величины общей площади удельной поверхности почв, в том числе за счет уменьшения площади внешней поверхности.
4. Полученные в лабораторном опыте результаты могут свидетельствовать о том, что дегумификация почв в естественных природных условиях или антропогенно преобразованных системах неизбежно будет приводить к изменению водно-физических свойств почв и нарушению их сорбционной функции.

Литература

Васенев В.И., Прокофьева Т.В., Макаров О.А. (2013) Разработка подхода к оценке запасов почвенного органического углерода мегаполиса и малого населенного пункта. *Почвоведение* 6. 725–736.

- Водяницкий Ю.Н. (2015) Органическое вещество в городских почвах (обзор литературы). *Почвоведение* **8**, 921–931.
- Грег С., Синг К. (1984) Адсорбция, удельная поверхность, пористость. Пер. с англ., 2-е изд. М.: Мир, 306 с.
- Шваров А.П., Коренева Е.А. (2008) Явление гистерезиса зависимости капиллярно-сорбционного потенциала воды от влажности почвы. *Почвоведение* **10**, 1179–1187.
- Шейн Е.В. (2005) Курс физики почв. М.: Изд. МГУ, 431 с.

УДК 631.671.1

АДАПТАЦИЯ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ К УСЛОВИЯМ ПРИАРАЛЬЯ

Стулина Г.В.^{*1}, Солодкий Г.Ф.², Кенжабаев Ш.М.¹

^{*1}International Fund for the Aral Sea saving, Interstate Coordination Water Commission,
Scientific - Information Center (SIC ICWC), Tashkent, Uzbekistan, E-mail:
galina_stulina@mail.ru

²International Fund for the Aral Sea saving, Interstate Coordination Water Commission,
Scientific - Information Center (SIC ICWC), Tashkent, Uzbekistan, E-mail: solodky_g@mail.ru

ADAPTATION OF THE MODERN WATER RESOURCES MANAGEMENT MODELING SYSTEM TO THE CONDITIONS OF THE ARAL SEA REGION

Stulina.V., Solodkyi G.F., Kenzhabaev Sh.M.

^{*1}International Fund for the Aral Sea saving, Interstate Coordination Water Commission,
Scientific - Information Center (SIC ICWC), Tashkent, Uzbekistan, E-mail:
galina_stulina@mail.ru

²International Fund for the Aral Sea saving, Interstate Coordination Water Commission,
Scientific - Information Center (SIC ICWC), Tashkent, Uzbekistan, E-mail: solodky_g@mail.ru

Annotation: В статье рассматриваются результаты расчёта режима орошения по программе REQWAT, модифицированной версией CROPWAT, дополненной учётом в водном балансе подпитки из грунтовых вод. Расчёт режима орошения проводится для откорректированных гидромодульных районов, на основе изменившихся природно-климатических условий.

Ключевые слова: Приаралье, ГИС, гидромодульное районирование, водопотребление, режим орошения, программа REQWAT.

Введение

Данная работа выполняется в соответствии с принятой Концепцией развития водного хозяйства Республики Узбекистан на период до 2030 года на основании Указов и Постановлений правительства Узбекистана.

Концепция предусматривает развитие водохозяйственного комплекса республики. Основной целью Концепции является определение основных путей решения проблем управления и использования водных ресурсов, дальнейшее развитие водохозяйственного комплекса, совершенствование системы управления водным хозяйством и мониторинга воды. Концепция в основном затрагивает вопросы управления и использования поверхностных водных ресурсов, развитие ирригационной и мелиоративной инфраструктуры, водосбережения в орошаемом земледелии. Одним из путей решения данной проблемы является реализация современной системы моделирования управления водными ресурсами.

Методы исследований

В основе расчетов обоснованного водопотребления принята программа CROPWAT - инструмент поддержки принятия решений, разработанный ФАО [Smith M. FAO, № 46, 1992]. Одним из недостатков программы CROPWAT является то, что она не предназначена для пакетной обработки расчета потребности в воде для сельскохозяйственных культур. Возникла необходимость в пакетной версии модели потребности в воде. Такая программа, названная REQWAT, была разработана в проекте WUFMAS и усовершенствована в проектах CAWA, PEER, SATREPS (cawater.info-net). Программа REQWAT основана на алгоритме расчета водного баланса ФАО, но уже с учетом в водном балансе грунтовых вод.

Входные параметры для моделей водопотребления получены инновационными методами, основанными на создании модели поверхности земли (почвы), и фиксации фаз роста и развития растений на основе оценки водно-энергетического баланса на исследуемой территории.

Исследования включают:

- Выбор пилотного объекта.
- Методологии сбора информации, выбор и сбор исходной информации на пилотных участках.
- Сбор исходных данных: климат, почвенный покров, уровень грунтовых вод.
- Гидромодульное районирование территории.
- Расчет водопотребления выращиваемых с/х культур и сбор исходной информации на пилотных участках.

Объект исследования Элликкалинский район Каракалпакии

Рассматриваемая территория Приаралья характеризуется засушливым климатом, засоленными почвами, местами близким залеганием минерализованных грунтовых вод, недостатком водных ресурсов. Неправильное орошение засоленных земель в условиях, минерализованных с высоким уровнем грунтовых вод приводит к вторичному засолению почв.

Избыточное увлажнение или недостаточное орошение приводит к засолению почв и снижению продуктивности земель.

Научно обоснованный режим орошения, основанный на моделировании водного баланса, позволит исключить возможные негативные последствия. Изучение инновационных методов мониторинга параметров моделирования и засоленности почвы и их применение приблизит к решению проблемы.

Результаты

Гидромодульное районирование

Определение требований на воду орошаемых земель для планирования и распределения воды из ирригационной системы производится на основе

гидромодульного районирования. Гидромодульное районирование – это районирование территории на таксонометрические единицы (ГМР) по климатическим данным, почвенным характеристикам в сочетании с гидрогеологическими и другими природными и ирригационно-хозяйственными особенностями территории. Последнее гидромодульное районирование территории Узбекистана было проведено в 1986-1989 годах [Беспалов, 1986]. Применяя современные методы расчета водопотребления оросительных и поливных норм, сроков и норм поливов на основе компьютерных моделей в среде ГИС, была разработана методика, по которой осуществляется корректировка границ гидромодульных районов и режимов орошения. Работа позволила предложить пользователям-практикам карту гидромодульных районов и таблицы рекомендованных сроков полива, поливных и оросительных норм по средним показателям (климата, сроков сева и др.), а также адаптированную программу расчета водопотребления, позволяющую корректировать режим орошения на сложившуюся ситуацию.

Учитывая, что особенности природно-хозяйственных условий, определяющие гидрографическое районирование, являются динамичными, гидромодульные зоны не могут рассматриваться как неизменные, и периодически должен проводиться их периодический пересмотр. В качестве такого пересмотра используется анализ степени изменчивости отдельных факторов.

Глубина залегания грунтовых вод

На основе анализа трехлетних наблюдений (2009-2021 гг.) за УГВ с 10-дневной периодичностью замеров, наибольший УГВ наблюдается летом, а наименьший - в зимний период (исключение составляют территории, подверженные воздействию дренажных вод, где уровень воды повышается в период зимнего выщелачивания солей - промывка). Среднегодовой УГВ <2 м покрывает около 31% орошаемых земель Элликкаллинского района (рис.1). Основная часть грунтовых вод "теряется" на испарение и транспирацию растениями из-за равнинного рельефа, пологих склонов на основной территории района исследования, а также затрудненного дренажа и сурового климата. Максимальное испарение грунтовых вод происходит в период с апреля по сентябрь, когда температура воздуха высокая, а глубина залегания УГВ небольшая. Часть грунтовых вод поступает на неорошаемые земли, озера и за пределы территории через коллекторно-дренажную сеть. Уровень грунтовых вод определяет объем дополнительной воды, поступающей в корнеобитаемый слой помимо водоподдачи на орошение, но одновременно он влияет на увеличение или уменьшение соленакопления в зоне аэраций. Недоучет этой составляющей может вызвать переполив, излишние затраты воды и, самое негативное последствие - вторичное засоление почв.

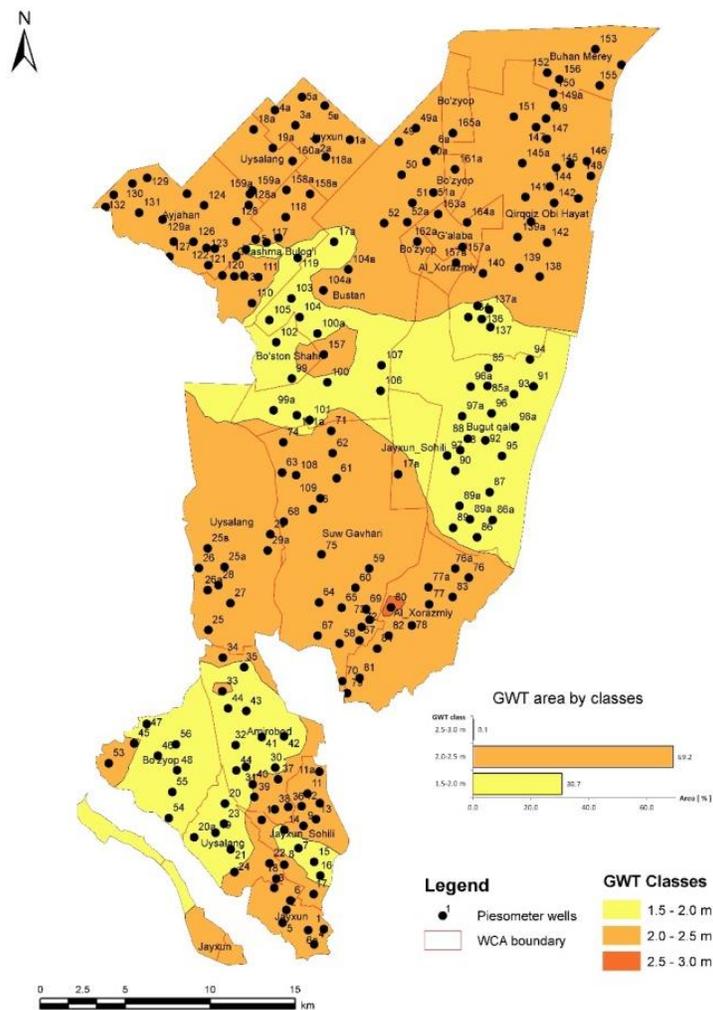
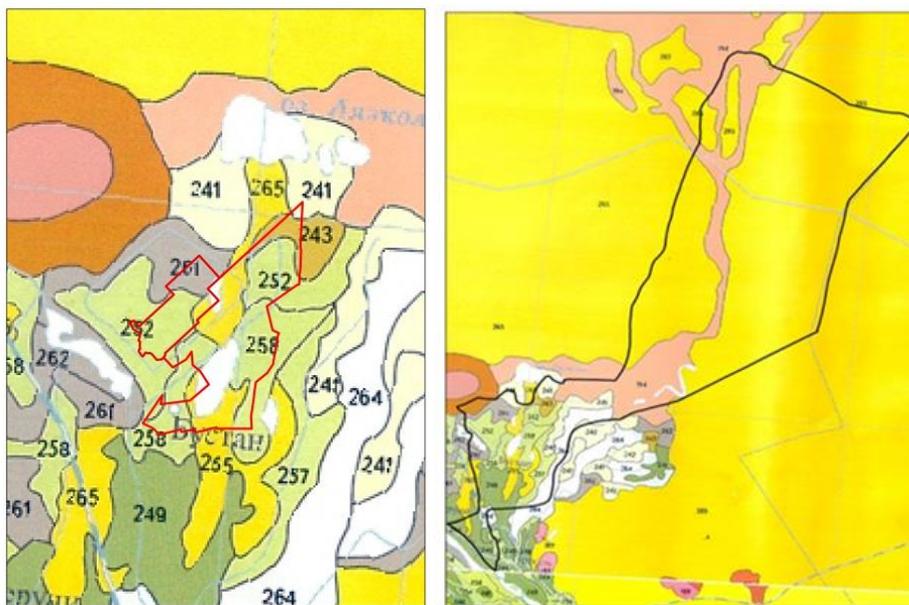


Рис. 1. Карта залегания УГВ Элликалинского района (усредненная с 2019-2021 гг.).

В настоящее время в пределах Элликалинского района существует 329 мониторинговых скважин для замера УГВ и минерализации грунтовых вод (МГВ).

Почвенный покров. В геоморфологическом отношении это плоская дельтово-аллювиальная равнина Амударьи, сложенная слоистыми аллювиальными отложениями Элликалинского района представлен луговыми, такырно-луговыми, залежные и различной давности освоения и орошения. Большая площадь песков, с участками пустынно-песчаных почв (рис. 2).



■ 243 Такырно-луговые и лугово-такырные почвы (целинно-залежные) преимущественно среднесуглинистые и легкосуглинистые, сильно-и среднесолончаковые
■ 251 Староорошаемые луговые аллювиальные почвы легкосуглинистые и супесчаные, сильнозасолённые с пятнами очень сильнозасолённые
■ 252 Новоорошаемые луговые аллювиальные почвы тяжелосуглинистые, иногда глинистые, слабозасолённые, местами промытые
■ 258 Новоорошаемые луговые аллювиальные почвы легкосуглинистые и супесчаные, сильнозасолённые с пятнами очень сильнозасолённых
■ 265 Пески полужакрепленные и незакрепленные грядовые, бугристые и барханные с участками пустынных песчаных почв

Рис. 2. Почвенная карта Элликалинского района

Построение карты гидромодульных районов

Определение оросительных норм сельскохозяйственных культур в странах ЦАР основывается на гидромодульном районировании территории, включающем следующие таксономические единицы (Табл. 1). Отличительными признаками ГМР являются мощность мелкоземистого слоя, гранулометрический состав, строение и сложение почв и глубина залегания грунтовых вод, влияющие на капиллярный подток влаги в корнеобитаемую зону, и запасы воды при предельно полевой влагоемкости.

Гидромодульное районирование было откорректировано на новые условия с использованием картографической основы: областной и районной (масштаб 1:200 000; 1:100 000; 1:50 000).

Таблица 1. Гидромодульное районирование

Гидромод. район	Характеристика почвы
<i>Автоморфные почвы (УГВ > 3 м)</i>	
I ^a	Очень маломощные, сильнокаменистые разные по гранулометрическому составу
I	Маломощные (0,2-0,5 м) среднекаменистые различного гранулометрического состава на песчано-галечниковых отложениях и на гипсах, а также мощные песчаные
II	Среднемощные слабокаменистые разные по гранулометрическому составу на песчано-галечниковых отложениях и гипсах; мощные супесчаные и легкосуглинистые
III	Мощные средне-, тяжелосуглинистые и глинистые
<i>Полугидроморфные почвы (УГВ 2-3 м)</i>	
IV	Мощные песчаные и супесчаные, а также мало- и среднемощные разного гранулометрического состава
V	Мощные легко- и среднесуглинистые однородные; тяжелосуглинистые, облегчающиеся к низу
VI	Мощные тяжелосуглинистые и глинистые плотные, однородные; разные по гранулометрическому составу, слоистые по строению
<i>Гидроморфные (УГВ 1-2 м)</i>	
VII	Мощные песчаные и супесчаные, а также мало- и среднемощные разного гранулометрического состава
VIII	Мощные легко- и среднесуглинистые однородные; тяжелосуглинистые, облегчающиеся к низу
IX	Мощные тяжелосуглинистые и глинистые плотные, однородные; разные по гранулометрическому составу, слоистые по строению

Работа с такой основой позволяет уточнить территориальное расположение гидромодульных районов и откорректировать таблицу рекомендованных режимов орошения. Гидромодульное районирование или построение карты гидромодульных районов проводилось путем наложения в системе ГИС двух картографических слоев: почва и уровень грунтовых вод. В зависимости от наличия исходных характеристик, их детализации, возможно следующие варианты их использования построения карты ГМР и расчета водопотребления.

Вариант 1. Возможно использовать почвенную карту с выделенными почвенными разностями, в характеристиках которых указан гран. состав. Для перевода в классификацию ФАО, в этом случае использовать полученное соотношение двух классификаций для условий Центральной Азии [проект WUFMAS, 1997, 1998 sawater-info.net] (табл. 2, рис. 2, 3, 4, 5).

Таблица 2. Величины доступной почвенной влаги и скорости инфильтрации по почвам различного гранулометрического состава в Центральной Азии (WUFMAS)

Класс почвы по мехсоставу (USDA)		AWC (1) мм/м	Скорость инфильтрации (2) мм/сутки
Z	Пыль	160	144
ZL	Пылеватый суглинок	160	192
ZC	Пылеватые глины	170	48
ZCL	Пылевато-иловатые суглинки	160	120
L	Суглинки	155	240
SL	Опесчаненные суглинки	145	480
LS	Супеси	100	720
fS	Мелкий песок	80	960
cS	Крупный песок	60	2400
gS	Гравелистый песок	40	4800
SCL	Опесчаненный иловатый суглинок	190	240
CL	Иловатый суглинок	180	192
C	Глина	210	12

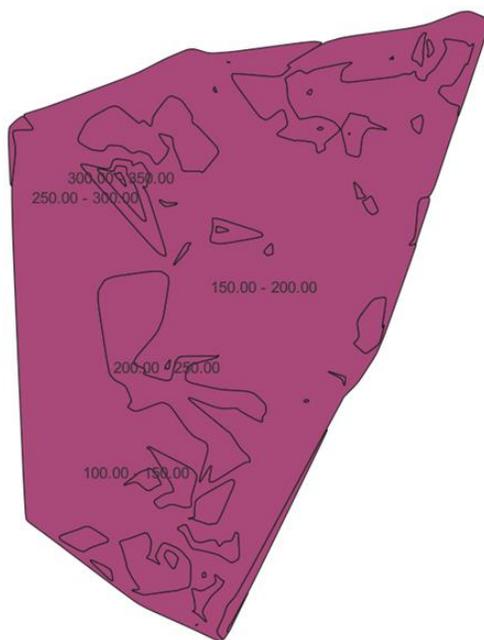


Рис. 3. Карта уровня грунтовых вод, Элликкала

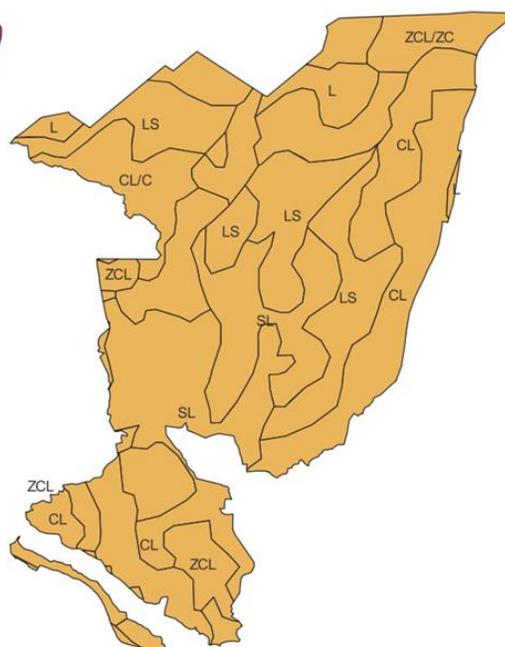


Рис. 4. Контуры гранулометрического состава

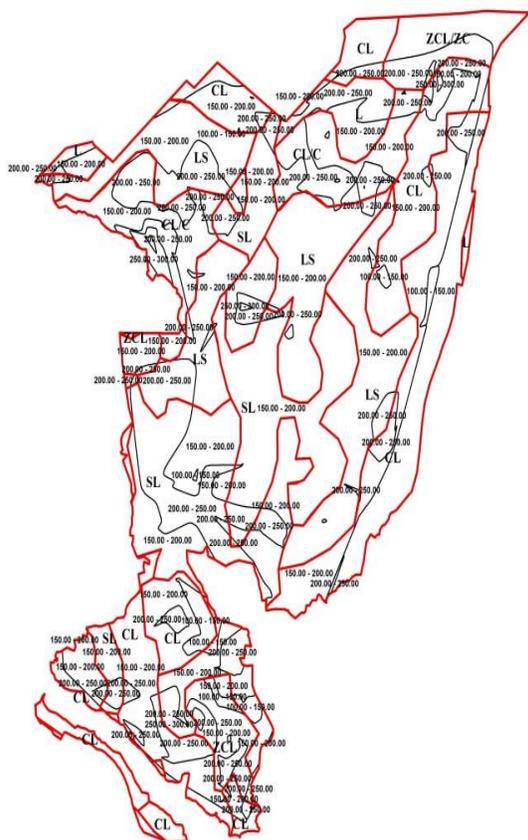


Рис. 5. Выделение контуров ГМР

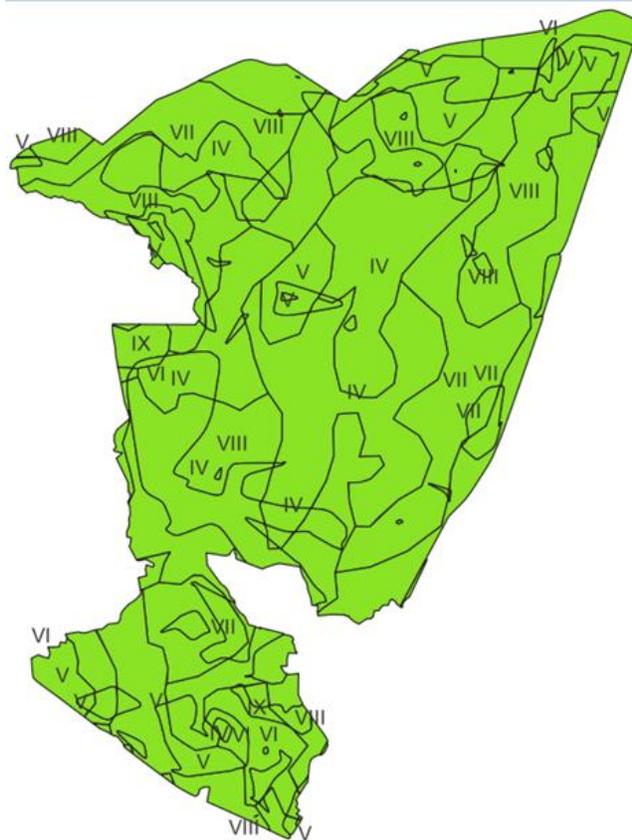


Рис. 6. Карта гидромодульных районов
Элликалинского района

Вариант 2. Экспликация к почвенным картам содержит не только название разности почв, но и результаты анализов гранулометрического состава, содержание почвенных гранулометрических фракций. Такой детальный исходный материал был необходим для обеспечения программы информацией по гранулометрическому составу почв для перехода от классификации [Качинский, 1958], принятой в нашей практике, к классификации ФАО. Пересчет фракций проводился по специально написанной для этой цели программе MACRO [WUFMAS, 1997, sawater-info.net] или по треугольнику ФЕРРЕ [Шеин, 2005].

Новая почвенная карта, карта гидромодульных районов построены в масштабе 1:200000, достаточном для описания территории в 100 тыс. га (рис. 4, 6).

Следующим шагом является детализация гидромодульного районирования в связи с реструктуризацией хозяйств, формированием фермерских хозяйств и организацией АВП, кластеров. Так как заявки на воду поступают от фермеров, они совместно с гидротехником и агрономом составляют таблицу (табл. 3), в которой по каждому отводу в АВП указываются подвешенная к нему площадь с делением её на ГМР. Затем, каждый гидромодульный район, в свою очередь, делится на площади

под каждой конкретной культурой. Эти таблицы должны явиться исходными для обобщения и суммирования площадей ГМР по каналу в привязке к структуре посева.

Таблица 3. Перевод классификации гранулометрического состава

УГВ	Гранулом. состав	Контура	Г.М.Р
100-150	LS	257,262,258,249,	VII
	SL	265,249	VIII
150-200	L	178,243,262	VIII
	ZCL/ZC	194	VIII
	ZCL,	261, 255	IX
	CL/C	252	VIII
	CL	264,245,241,244	VIII
200-250	L	178,243,	V
	CL/C	252,	V
	LS	257,262,258	IV
	SL	265,249	IV
	CL	264,245,241,244	V
	ZCL	261,255	VI
	ZCL/ZC	194	VI
250-300	CL/C	252	V
	SL	249	IV
	CL	241,244	V
	ZCL	255	VI
Глубже 300	CL/C	252	III

План водопользования формируется первоначально фермерами на уровне АВП, кластера, на основе распределения площадей по гидромодульным районам. Такая детализация требует работы на основе картографического материала в масштабе 1:10 000, 1:25 000.

Классификация территории по УГВ проводилась на основании состояния УГВ на 1 апреля. Для большей статистической достоверности были использованы результаты наблюдений гидромелиоративной службы по Элликкалинскому району Узбекистана за последние 3 года. Средствами ГИС были составлены карты расположения наблюдательных скважин и собран материал по наблюдениям УГВ в этих скважинах. Данные УГВ на 1 апреля каждого года за последние 3 года затем были осреднены. По осредненным данным была построена карта изолиний УГВ для следующих градаций: 0,0–1,0 м; 1,0–1,5 м; 1,5–2,0 м; 2,0–3,0 м; 3,0–5,0 м; > 5 м.

Затем карта была переведена в электронный формат в виде Shape-файла.

Расчет режима орошения программой REGWAT (модифицированной версией CROPWAT [проект WUFMAS, 1997, 1998 cawater-info.net]).

Потребности сельскохозяйственной культуры в воде определяется как количество воды, требующейся для удовлетворения расхода воды на эвапотранспирацию культуры (ЕТс.) Для расчета ЕТс требуется трехстадийный метод.

Программа CROPWAT рассчитывает суточную эвапотранспирации культуры (ЕТс) на основе рассчитанной эвапотранспирации гипотетической эталонной культуры, которой является трава, выращиваемая в хороших условиях (ЕТо) и как бы растущая на том же поле, что и реальная культура. Расчет проводится при помощи переходного коэффициента для конкретной культуры. По международному соглашению ЕТо оценивается в программе CROPWAT с помощью метода Пенмана-Монтейта, Этот метод учитывает радиацию по количеству часов солнечного сияния и температуру воздуха, и затем из рассчитанной величины эвапотранспирации с помощью корректировки на воздействие скорости ветра и относительной влажности воздуха получают эвапотранспирацию эталонной культуры.

Расчет производится следующим образом.

Первоначально определяется потенциальная эвапотранспирация, зависящая только от климата. Модифицированный метод Пенмана-Монтейта предлагает лучшие результаты. Ниже приводится формула определения эталонной эвапотранспирации.

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

где

ET_o - эталонная эвапотранспирация [мм сут⁻¹];

R_n - чистая радиация на поверхности растений [МДж м⁻² сут⁻¹];

G - плотность теплового потока почвы [МДж м⁻² сут⁻¹];

T - среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м [°C];

u_2 - скорость ветра на высоте 2 м [м с⁻¹];

e_s - давление пара насыщения [кПа];

e_a - фактическое давление [кПа];

$(e_s - e_a)$ - дефицит давления пара насыщения [кПа];

Δ - уклон кривой давления пара [кПа °C⁻¹];

γ - психрометрическая постоянная [кПа °C⁻¹].

Следующий шаг расчета, учет эвапотранспирации культуры - ***ETact***

$$ET_{act} = ETo * Kc \quad (2)$$

где ETo –или иначе потенциальная эвапотранспирация, Kc коэффициент культуры, зависящий от вида культуры.

Недостатком программы CROPWAT является то, что она не предназначена для пакетной обработки расчетов потребности сельскохозяйственных культур в воде.

Возникла необходимость иметь пакетную версию CROPWAT.

Важный вклад в создание модели CROPWAT был сделан следующим образом:

1. Подход, имитирующий пакетную работу программы.
2. Макроинтерфейс в MS Access, облегчающий извлечение входных данных.
3. Добавлен элемент в расчет водного баланса - вклад подземных вод.

Модифицированная версия названа REQWAT.

В общем случае водный баланс выражается как:

$$ET \text{ (эвапотранспирация)} = I \text{ (осадки)} + P \text{ (орошение)} + CR \text{ (вклад подземных вод)} \quad (3)$$

Испарение с поверхности почвы и транспирация истощают запасы влаги в корнеобитаемом слое, который формируется за счет орошения, осадков и пополнения из грунтовых вод,

Формула Харченко –Лактаева с модификацией Хорста:

$$Contr = a * ETo / e^{(b * (D - R))} \quad D > R \quad (4)$$

$$Contr = ETo \quad D \leq R$$

Ниже приводится пример расчеты программой для восьмого гидромодульного района, где проявляется влияние подпитки из грунтовых вод для хлопчатника (Табл 4).

Таблица 4.

Имя поля	Почва	КПД поля %	Дата расчета	Культура	Допуст.истош. %	Ущерб %	Сев	Объемлрг м3/га	Эфф. осадки мм	Подпитка мм	ЕТс за вег. мм	Концец.вег.
ПОЛЕ_8	8	0,85	2024.04.29	Хлопок	20	17	2025.04.20	3638	16,43	372,09	780	2025.11.1
Имя поля	ПОЧВА	КПД %	ДАТА РАСЧЕТА	КУЛЬТУРА	№ПОЛИВА	Дата полива	НОРМА м3/га	КОРНИ м	УГВ см	ЭФФ.ОСАДКИ мм	ПОДПИТКА ИЗ ГВ мм	ЕТс мм
ПОЛЕ_8	8	0,85	2024.04.29	Хлопок	1	2025.06.24	1084	1,2	173,0343956	10,96	68,7	173,36
ПОЛЕ_8	8	0,85	2024.04.29	Хлопок	2	2025.07.29	1277	1,2	173,0343956	0,91	111,47	222,88
ПОЛЕ_8	8	0,85	2024.04.29	Хлопок	3	2025.09.05	1277	1,2	173,0343956	1,16	111,73	223,4

Оросительная норма составляет 3638 куб.м/га. В то же время по расчетам для второго гидромодульного района она составила 5373 куб.м /га.

Обсуждение результатов

Предлагаемая программа REQWAT [Стулина Г.В., Солодкий Г.Ф, НИЦ МКВК ЦА, 2020] обеспечивает не только водопотребление на текущий момент времени, но

и делает расчёт на будущее с учётом изменяющихся природных климатических условий, прежде всего климата [Стулина Г.В., Солодкий Г.Ф. 2020].

Выполненная работа позволила уточнить границы гидромодульных районов по территории Элликкалинского района и составить карту гидромодульных районов для практического применения.

Приведенная методика использования созданного программного продукта позволила уточнить резервы всей будущей водоподачи, выработать соответствующие нормы поливов, в результате чего возможно снижение объема водопотребления. Более того, продемонстрирована возможность и необходимость ежегодно уточнять режимы орошения на основе представленной методики с учетом того, что отличие реальных лет от среднеголетних показателей составляет до 20% по величине водоподачи.

Литература

- Гидромодульное районирование и режимы орошения сельскохозяйственных культур по Ферганской области, под рук. Беспалова Н.Ф., “НПО Союзхлопок”. - Ташкент, 1986
- Качинский Н.А. (1958) Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.
- Шейн Е.В. (2005) Курс физики почв. М.
- Стулина Г.В., Солодкий Г.Ф. (2020) Использование усовершенствованной методики ФАО для оценки водопотребления сельскохозяйственных культур в процессе орошения в Центральной Азии”. Под общ. ред. Проф. Духовного. Ташкент: НИЦ МКВК ЦА, 127.
- Smith M. (1992) CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management *Food and Agriculture Organization of the United. irrigation and drainage paper 46.*

УДК 631.4

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ГЕЛЕЙ ПОЧВ В ИЗУЧЕНИИ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ

Сухарев А.И.¹, Тарасенко Д.А.²

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
suharevai@my.msu.ru

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
ushkova_dasha@mail.ru

Properties of organo-mineral soil gels in study of soil properties
Suharev A.I., Tarasenko D.A.
Faculty of Soil Science of Moscow State University

Annotation: Soil organo-mineral gels are able to retain water, conduct electricity and change their structure. Rheopexy of soil pastes, electrical conductivity of soils in the area of the PLAW and interaction of soils with water vapour can be explained taking into account these features of the soil gels.

Введение

Трёхфазная модель основана на существовании в почвах трех агрегатных состояний: твердого (минеральные и органические частицы), жидкого (почвенный раствор) и газового (почвенный воздух) (Hillel, 2003; Шеин, 2005).

Данную модель используют для объяснения физических свойств почв, однако она не всегда справляется с этой задачей.

В последние десятилетия для объяснения полученных результатов стали активно привлекать представления о существовании в почвах органо-минеральных гелей, которые покрывают и связывают между собой почвенные частицы (Тюлин, 1958; Федотов, 2012).

С позиции гелевой модели почва представляет собой аналогичную трехфазной модели систему из трех агрегатных состояний. Отличие заключается в наличии на поверхности твердой фазы термодинамически неравновесного гелевого слоя, который состоит из коллоидных частиц.

Почвенные коллоиды – твердые частицы в жидкой фазе – могут существовать в виде золь и гелей. Золи – неустойчивые образования, которые при повышении температуры, ионной силы раствора, высушивании и других факторов коагулируют с образованием гелей (Щукин и др., 2004). Обратный переход из гелей в золи требует соблюдения условий для пептизации, которые трудно достижимы в почвах. Поэтому коллоиды в почвах, в основном, существуют в форме гелей.

Минеральные почвенные коллоиды образуются при выветривании минералов (Cronan, 2018) и стабилизируются органическим веществом почв за счёт

электростатических взаимодействий, сил Ван-дер-Ваальса, гидрофобных сил, Н-связывания, образования катионных мостиков, хелатирования поверхностных ионов, лигандного обмена, а также стерических эффектов (Philippe et al., 2014).

Специфическое органическое вещество – гуминовые вещества, которые стабилизируют минеральные коллоиды, также существуют в виде частиц коллоидных размеров (Senesi et al., 2008). Эти частицы-молекулы взаимодействуют друг с другом, формируя надмолекулярные образования (НМО), которые являются основой почвенных гелей.

В результате объединения органических и минеральных коллоидных частиц между собой и с более крупными минеральными частицами формируются органо-минеральные пленки-гели (Тюлин, 1958; Осипов, 1979). Эти пленки покрывают и связывают почвенные частицы разных размеров между собой, создавая почвенные отдельности.

Существование почвенных коллоидов почти исключительно в форме гелей известно на протяжении десятилетий из работ различных авторов. Однако попытки объяснить физические свойства почв с этих позиций предпринимались в малом количестве.

Целью работы являлась оценка применимости использования трехфазной и гелевой моделей почв для анализа результатов изучения некоторых физических свойств почв.

Объекты и методы

Изучались свойства образцов, отобранных из гумусовых горизонтов почв зонального ряда:

- дерново-подзолистой почвы (Московская область);
- серой лесной почвы (Тульская область);
- чернозёма выщелоченного (Орловская область);
- каштановой почвы (Волгоградская область).

Реопексию почв изучали, определяя вязкость почвенных паст.

Образцы готовили к вискозиметрии следующим образом. Почвы были высушены до воздушно-сухого состояния, затем путём добавления воды к высушенным образцам были приготовлены образцы различной влажности. После увлажнения образцы выдерживали в герметичных контейнерах в течение 14 суток.

По прошествии данного срока из образцов почв готовили почвенные пасты: к почвам была добавлена навеска воды, затем пасту перемешивали стеклянной палочкой в течение 3–5 мин. Навеску воды устанавливали, исходя из оптимального диапазона работы вискозиметра. Итоговое содержание воды в пастах составило для дерново-подзолистой почвы — 37%, для серой лесной — 47%, для чернозёма — 57%, для каштановой почвы — 47%.

Механическая обработка почвенных паст осуществляли с помощью мешалки MLW MR 25 (Германия).

Для измерения вязкости почвенных паст использовался вибрационный вискозиметр SV-10 (AND, Япония). Принцип работы прибора заключается в поддержании амплитуды вынужденных колебаний измерительного элемента (камертонов), погружённых в вязкую среду, путём регуляции силы тока. Время измерения — 15 с. Амплитуда колебаний камертонов — 2 мм.

Для изучения влияния размера частиц на вязкость почвенных паст определялся гранулометрический состав паст с помощью лазерного дифрактометра Mastersizer 3000 (Malvern, Great Britain). Суспензии готовили путём добавления 10 г пасты к 250 мл воды и перемешивания полученной суспензии на протяжении 20 мин.

Для изучения подвижности ионов в почвах измеряли электрическое сопротивление почвенных образцов.

Образцы почв доводили до требуемой влажности путём высушивания. Однако при обычном высушивании скорость испарения влаги превышала бы скорость её перераспределения по почве, тогда как для корректности результатов кондуктометрии необходимо было обеспечить равномерное распределение влаги по образцу (по агрегатам). С этой целью применяло медленное высушивание следующим образом. Образец почвы помещали в контейнер $110 \times 65 \times 40$ мм. Для замедления испарения воды контейнер накрывал хлопковой тканью и размещался в большем резервуаре с водой. Большой контейнер был накрыт пористым материалом с диаметром пор 25 мм. Такой способ позволил снизить скорость высыхания образца до 0,5% в сутки.

Для измерения электрического сопротивления образцов почв применяли четырёхэлектродный кондуктометр LandMapper-02.

Влажность почвенных образцов измеряли с помощью влагомера OHAUS MB 25.

Результаты и обсуждение

Реопексия почвенных паст

Вязкость почвенных паст всех почв менялась сходным образом: присутствовал пик при некотором содержании влаги, после которого следовало резкое снижение вязкости. Увеличение степени механического воздействия влекло за собой усиление выраженности пика. В качестве примера приведены данные для различных почв (рис. 1).

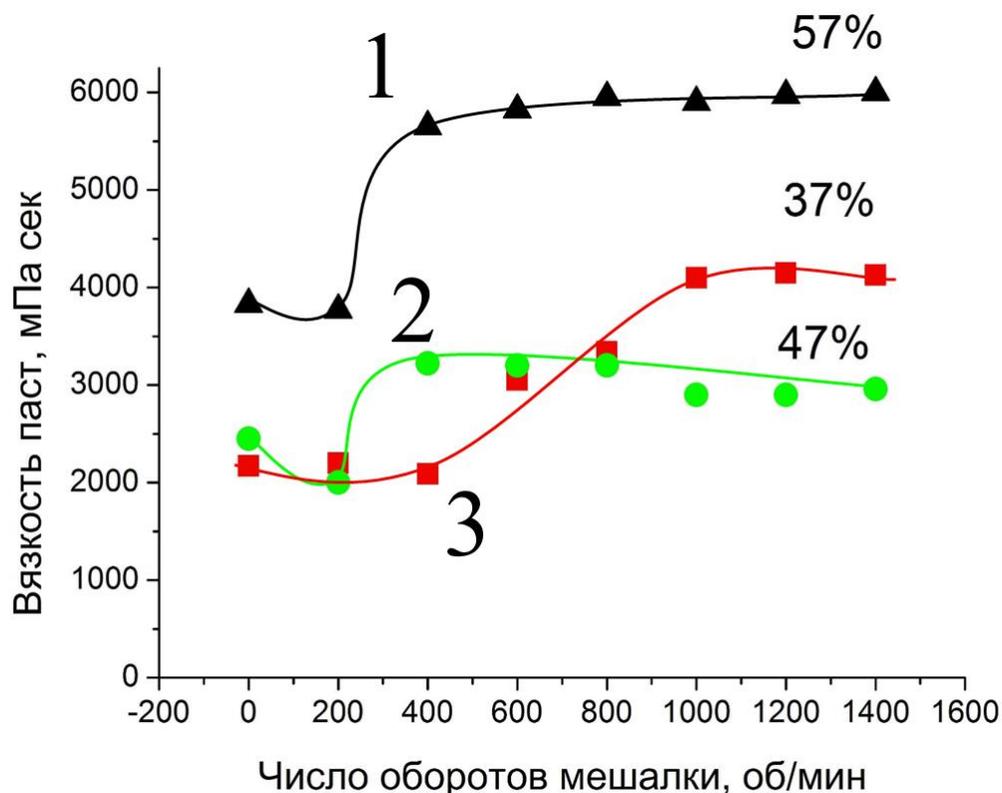


Рис. 1. Влияние величины механического воздействия на вязкость почвенных паст. 1 — чернозём, 2 — серая лесная почва, 3 — дерново-подзолистая почва

Трудно объяснить полученные данные с точки зрения трёхфазной модели, поскольку пик вязкости не может быть связан с прочностью частиц почв: измельчение частиц не изменяет их объём, а увеличение вязкости основано на увеличении объёмной доли твёрдой фазы, что следует из уравнения Эйнштейна (1).

$$\eta = \eta_0(1 + \alpha\varphi) \quad (1)$$

где η_0 — вязкость дисперсионной среды, φ — объёмная доля твёрдой фазы, α — коэффициент, зависящий от формы частиц.

Само по себе явление увеличение вязкости паст при усилении механического воздействия представляет собой реопексию, которая известна для почв (Шеин, 2005). Среди дисперсных систем реопексия встречается редко и проявляется при небольших напряжениях сдвига. Объясняется данное явление тем, что малые механические воздействия влекут за собой увеличение скорости перемещения частиц, соответственно, случайное образование упорядоченных структур через небольшие промежутки времени становится более вероятным (Торнер, 1972).

Для почвенных паст реопексия объясняется через образование более прочных структур из глинистых частиц вытянутой формы (Шеин, 2005).

С точки зрения гелевой модели почв, эта ситуация выглядит иначе. При механической обработке почвенных паст от гелей отделяются фрагменты (НМО). Фактически, описанный процесс представляет собой механическую активацию почв. При дальнейшем механическом воздействии число отделившихся НМО увеличивается, и они начинают объединяться в более крупные фрагменты. При этом происходит «захват» и, как следствие, кинетическое связывание свободной воды. По уравнению Эйнштейна (1) снижение подвижности воды в пасте эквивалентно увеличению объёмной доли твёрдой фазы в суспензии.

Для экспериментальной проверки предположения об образовании новых фрагментов гелей мы изучили распределение частиц по размерам в пастах, обработанных мешалкой при разной частоте вращения.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при обработке паст при более высоком числе оборотов в минуту размер частиц увеличивается (рис. 2). Такие результаты проблематично объяснить с точки зрения трёхфазной модели почв, поскольку размер частиц должен уменьшаться при более сильном механическом воздействии.

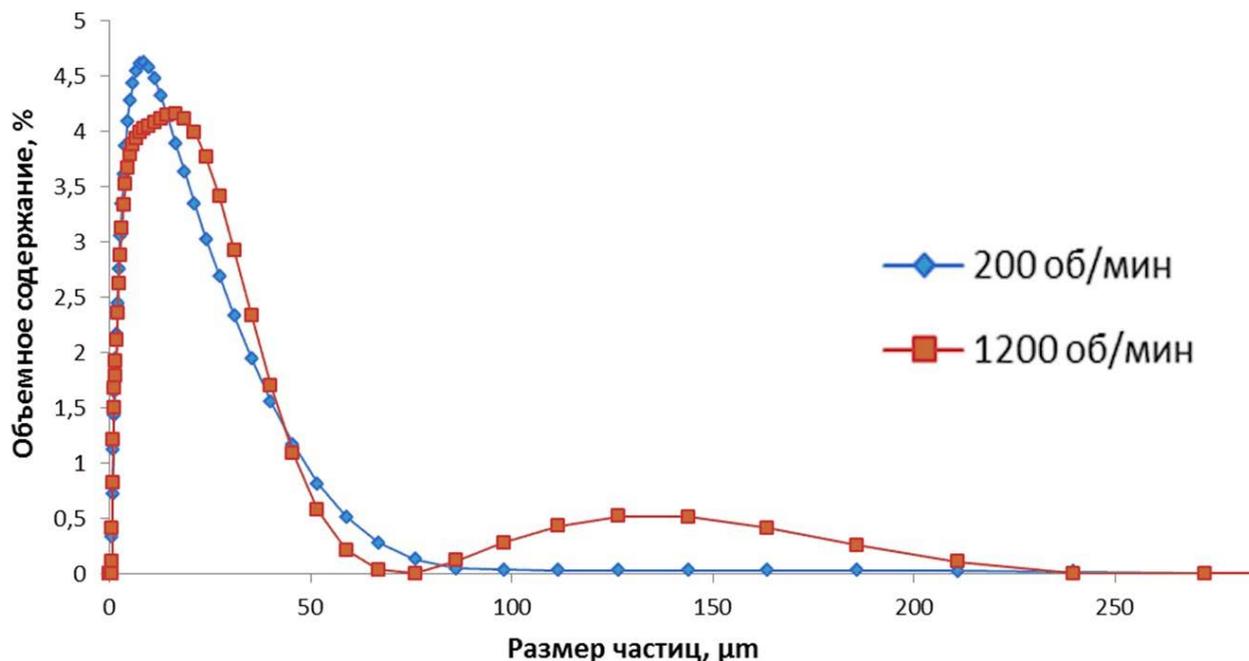


Рис. 2. Гранулометрический состав почвенной пасты, приготовленной из чернозёма и обработанной при различных скоростях вращения мешалки

Исходя из приведённых выше представлений о вязкости суспензий, увеличение размеров частиц сопровождается уменьшением количества свободной воды и

увеличением вязкости почвенной пасты. Это можно объяснить только включением кинетически свободной воды в надмолекулярные образования.

Электрическое сопротивление почвенных образцов

С точки зрения трёхфазной модели почва состоит из капилляров, заполненных водой и воздухом. Влажность разрыва капиллярной связи — это почвенно-гидрологическая константа, существование которой принято объяснять тем фактом, что непрерывный гидродинамический каркас в почве при определённой влажности разделяется, поскольку некоторые капилляры освобождаются от жидкой воды (Роде, 1965). Это приводит к резкому снижению подвижности воды. Влажности разрыва капилляров соответствует показатель максимальной молекулярной влагоёмкости, то есть предельной влажности, при которой вода внутри капилляров существует в виде плёнок, удерживаемых адгезионными силами (Смагин, 2006).

Принято считать, что вода в капиллярах размером менее 10 мкм теряет свою подвижность. Приведённая величина должна представлять собой толщину водной плёнки на поверхности твёрдой фазы, при этом такое значение толщины объясняется предельным расстоянием, на которое распространяется действие сил притяжения со стороны твёрдой фазы (Шеин, 2005). Довольно трудно принять такое представление с учётом того, насколько быстро силы межмолекулярного тяготения убывают с расстоянием. Из ряда данных следует, что максимальная толщина адгезионных плёнок не превышает нескольких слоёв молекул воды (Hillel, 2003), что явно не согласуется с расстоянием, равным 10 мкм.

С точки зрения гелевой модели почв, вопрос об объяснении потери подвижности воды в капиллярах размером менее 10 мкм объясняется заполнением этих капилляров гелем. Это предположение было проверено с помощью следующего эксперимента.

Потеря подвижности воды и общее нарушение сплошности водного каркаса в почве в области влажности разрыва капилляров должны естественным образом уменьшать электрический ток, протекающий через почву.

Основываясь на данных исследования удельного электрического сопротивления из чернозема (рис. 3), где влажность разрыва капилляров соответствует 28% (НВ = 40%), электрическое сопротивление в области влажности разрыва капилляров остаётся неизменным. Из этого следует, что часть воды в почве неким образом теряет подвижность и одновременно сохраняет электрическую проводимость.

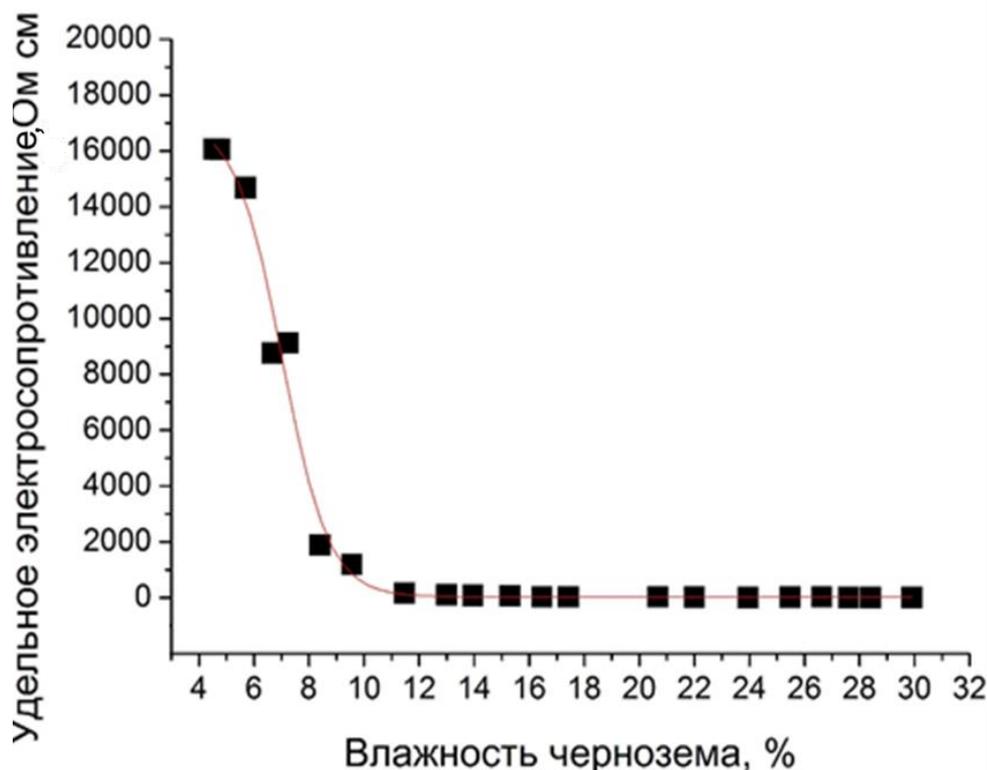


Рис. 1. Зависимость удельного электрического сопротивления от влажности почвенного образца

Объяснить наблюдаемое явление через прохождение тока по адгезионным плёнкам проблематично, так как состояние адгезионно связанной воды, и, как следствие, её электропроводность, должны отличаться от таковых у капиллярной воды (Hillel, 2003). Таким образом, возникает противоречие, которое не представляется возможным разрешить с точки зрения трехфазной модели почв. Однако оно устраняется, если принять, что часть воды внутри капилляров входит в состав гелей (в качестве дисперсионной среды), в силу чего её подвижность должна быть значительно снижена. При этом остаётся возможным протекание тока по почвенному раствору внутри геля.

Взаимодействие почв с водой

В качестве ещё одного примера рассмотрим процесс взаимодействия влажных почв с парами воды.

С точки зрения термодинамики вода может самопроизвольно переходить из одной фазы в другую тогда, если её химический потенциал в одной фазе выше, чем в другой. В качестве простого примера можно рассмотреть эксикатор с чистой водой, в который помещена чашка Петри с солевым раствором. Масса воды в чашке Петри со временем увеличивается — стремятся выровняться химические потенциалы

чистой воды в эксикаторе и химический потенциал воды в солевом растворе. Таким образом, вода через паровую фазу из эксикатора поступает в солевой раствор.

На перемещении воды согласно градиенту химического потенциала основаны методы измерения одной из почвенно-гидрологических констант — максимальной гигроскопичности (Вадюнина и др., 1986). Работа тензиометра тоже основана на этом принципе: жидкая вода из тензиометра поступает в почву, где её потенциал ниже, чем в тензиометре.

Исходя из приведённого выше совершенно логично предположить, что образец влажной почвы, помещённый в эксикатор с чистой водой, будет поглощать влагу из насыщенного воздуха. Это будет происходить до того момента, как наступит равновесие, то есть до того, как уравниются химические потенциалы воды в жидкой фазе почвы (в почвенном растворе) и в паровой фазе (в воздухе внутри эксикатора).

Было экспериментально установлено, что увлажнённые почвенные образцы в описанных условиях, вопреки термодинамическим представлениям, не поглощают влагу из паровой фазы эксикатора, а, наоборот, теряют её, то есть сохнут. В качестве примера приведены результаты, полученных нами для чернозёмов и дерново-подзолистых почв (рис. 4). В эксикаторе над чистой водой образцы почвы с влажностью 0,7–0,8 НВ теряют воду через паровую фазу.

С точки зрения трёхфазной модели объяснить, почему увлажнённые почвы сохнут в насыщенном влагой воздухе и каким образом вода перемещается от области меньшего химического потенциала к большему, не представляется возможным.

Однако можно предпринять попытку объяснить данные процессы с позиций гелевой модели почв. Примем во внимание тот факт, что частицы-молекулы гуминовых веществ имеют амфифильную природу (Милановский, 2009). Основываясь на термодинамических представлениях, можно говорить о том, что амфифильность частиц-молекул ГВ во многом определяет структуру гелей при различной влажности. Гидрофильные участки частиц-молекул гуминовых веществ самопроизвольно будут ориентироваться к водной фазе, в то время как гидрофобные участки будут стремиться не контактировать с водой, то есть будут обращены в сторону воздушной фазы. Поэтому, в частности, ниже определённой влажности гель имеет гидрофобную поверхность, выше этой влажности — гидрофильную.

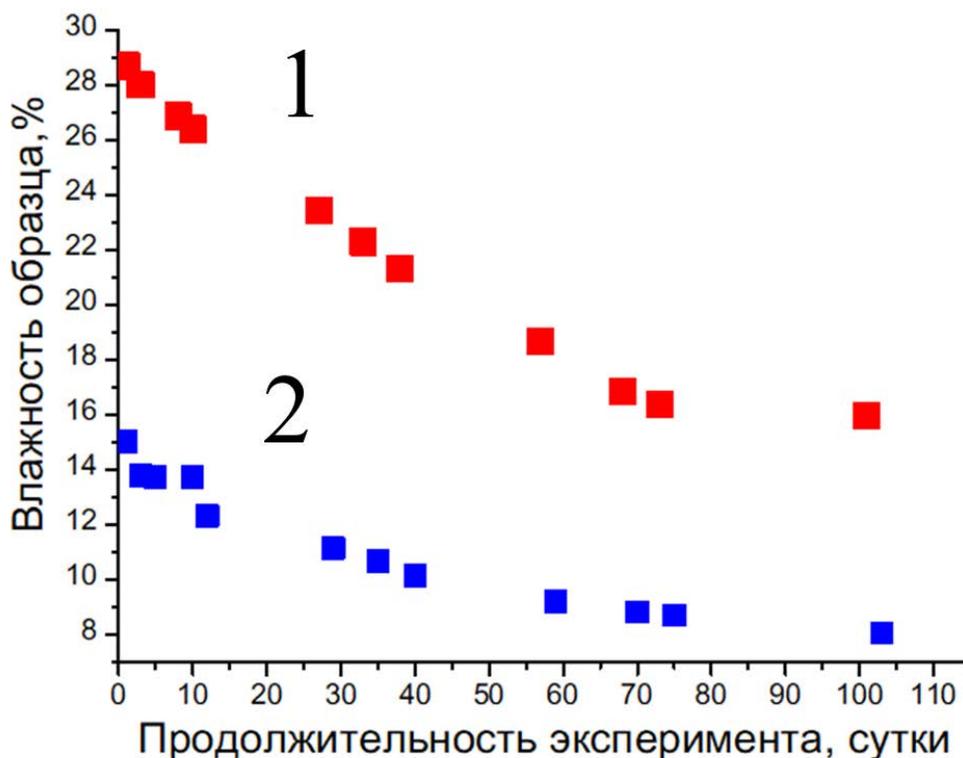


Рис. 4. Зависимость влажности почв от времени выдерживания в эксикаторе с водой.
1 — чернозём, 2 — дерново-подзолистая почва

Таким образом, когда вода покидает участок геля, содержание воды в нём падает, происходит структурная перестройка, ведущая к гидрофобизации поверхности геля. Обратному процессу, то есть попаданию воды в гель из паровой фазы, как раз препятствует образованная гидрофобная поверхность. Поэтому наблюдается высыхание почв в насыщенном водой воздухе.

Интересно отметить, что аналогичные физико-химические процессы используются в живых организмах. Например, установлено, что имеют место перестройки структур белков при взаимодействии прорастающих семян с водой (Обручева и др., 1997). Отмечено максимальное содержание влаги в некоторых частях семян, при достижении которого активизируются биохимические процессы.

Выводы

- 1) Предложено объяснение механизма реопексии почвенных паст, основанное на отделении от гелей фрагментов. Вода закрепляется между НМО и теряет подвижность.

- 2) Отсутствие скачка электросопротивления в почвенных образцах при достижении ВРК объясняется протеканием тока по гелям.
- 3) Обнаружено явление высыхания влажных почв в эксикаторе с водой, которое хорошо объясняется с позиций гелевой модели почв.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-14-00107.

Литература

- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. (1986) Методы исследования физических свойств почв. 3-е-е изд. Москва: Агропромиздат. 416
- Милановский Е.Ю. (2009) Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. Москва: ГЕОС, 2009. 186
- Обручева Н.В., Антипова О.В. (1997) Физиология инициации прорастания семян // *Физиология растений*, **2**, 287–302
- Осипов В.И. (1979) Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. Москва: МГУ. 235
- Роде А.А. (1965) Основы учения о почвенной влаге. Т. 1. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство.
- Торнер Р.В. (1972) Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчёта). Москва: Химия. 456
- Трофимов В.Т., Королёв В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. (2005) Грунтоведение. 6-е изд. Москва: МГУ. 1024
- Тюлин А.Ф. Органо-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. Москва: АН СССР, 1958. 52
- Федотов Г.Н., Добровольский Г.В. (2012) Возможные пути формирования нано- и микроструктур в гумусовых веществах почвенных гелей. *Почвоведение*, **8**, 908-920. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17794210>
- Федотов Г.Н., Третьяков Ю.Д., Иванов В.К., Куклин А.И., Пахомов Е.И., Исламов А.Х., Початкова Т.Н. (2005) Фрактальные коллоидные структуры в почвах различной зональности. *Доклады Академии Наук*, **405** (3), 351-354. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9149685>
- Федотов Г.Н., Шеин Е.В., Путляев В.И., Архангельская Т.А., Елисеев А.В., Милановский Е.Ю. Физико-химические основы различий седиментометрического и лазерно-дифракционного методов определения

- гранулометрического состава почв. *Почвоведение*, **3**, 310-317
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9515826>
- Шеин Е.В. (2005) Курс физики почв. Москва: МГУ. 432
- Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. (2004) Коллоидная химия. 3-е-е изд. Москва: Высшая школа. 445
- Cronan C. S. (2018) Mineral Weathering // *Ecosystem Biogeochemistry: Element Cycling in the Forest Landscape*, 87-100. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-66444-6.pdf>
- Hillel D. (2003) *Environmental Soil Physics*. Academic Press. 771
- Philippe A., Schaumann G.E. Interactions of dissolved organic matter with natural and engineered inorganic colloids: a review // *Environmental science & technology*, Vol. 48, No. 16, 2014. pp. 8946-8962.
- Senesi N., Wilkinson K. (2008) *Biophysical Chemistry of Fractal Structures and Processes in Environmental Systems*. Chichester: Wiley.
- Schaumann G. E. (2006). Soil organic matter beyond molecular structure Part I: Macromolecular and supramolecular characteristics. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(2), 145-156
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jpln.200521785?casa_token=QNdwow_NiTIAAAAAA:gVNm03Bi3BRf3EVnO5IOPFur5bY4peRU4k8QZfAv0PX1WXxjKFht_rXR18W4-UnStrDzOwHV7R_IxOMV

УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПАУ И ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ НА СВОЙСТВА КАШТАНОВЫХ ПОЧВ И СОЛОНЦА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Сушкова С.Н., Дудникова Т.С., Минкина Т.М., Замулина И.В., Барбашев А.И., Антоненко
Е.М., Шуваев Е.Г., Лацынник Е.С.

Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального
университета, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
snsushkova@sfnedu.ru

INFLUENCE OF PAHs AND HEAVY METALS POLLUTION ON THE PROPERTIES OF
CHESTNUT SOILS AND SOLINETZ UNDER DIFFERENT RESTORATION METHODS

Sushkova S.N., Dudnikova T.S., Minkina T.M., Zamulina I.V., Barbashev A.I., Antonenko
E.M., Shuvaev E.G., Latsynnik E.S.

Academy of Biology and Biotechnology behalf D.I. Ivanovskiy of the Southern Federal
University, Rostov-on-Don, Russian Federation
snsushkova@sfnedu.ru

Annotation: It has been shown that the dose of pollutants, soil properties and the use of sorbents have a decisive impact on the content of BaP and the sum of 16 PAHs, the gross content of Cu and the mobility of the metal, which is confirmed by the results of an analysis of the stability of Haplic Chernozem, Haplic Kastanozems (Dark chestnuts), Solonchaks typical using multivariate analysis of variance.

Введение

В настоящее время в глобальном масштабе происходит накопление техногенных элементов компонентами биосферы, так как на большинстве обследованных территорий поступление поллютантов в экосистемы превышает их естественное удаление. В техногенно загрязненных почвах происходит изменение физических, химических и биологических свойств почв (Минкина и др., 2011; Hosse et al., 2002). В результате снижается буферность почвы, ее устойчивость к антропогенному воздействию, что приводит к смещению сложившегося равновесия в почве и, соответственно, возрастанию экологически негативных последствий для всей биосферы в целом (Даувальтер, 2000; Елпатьевский, 1993; Федоров и др., 2010; Besten et al. 2006; Deckere et al., 2009). Поступая в почвы, и затем по пути транзита почвенных частиц в конечные водоемы стока, загрязняющие вещества претерпевают серию преобразований, в результате которых дисбаланс природных потоков еще более усиливается. В связи с этим, выяснение закономерностей перераспределения загрязняющих веществ между компонентами экосистем является одной из наиболее актуальных проблем сохранения биосферы.

Несмотря на значительное сокращение поступления новых поллютантов за счет усовершенствования технологий очистки выбросов предприятий, проблема негативного влияния техногенных токсикантов остается крайне важной. Так, многолетний мониторинг импактной зоны Новочеркасской ГРЭС (НчГРЭС), предприятия первого класса опасности, крупнейшего источника выбросов в Северном Приазовье, показал наличие загрязнения почвенного и растительного покрова ПАУ и ТМ (Zn, Cu, Pb, Ni, Cd, Cr) (Сушкова и др., 2012, 2014, 2016).. Данные мониторинговых исследований по изучению влияния выбросов химических предприятий на почвенный покров выявили сверхвысокий уровень загрязнения ПАУ (40-100 ПДК и более г) и Cu (10 ПДК) (Приваленко, 2002; Minkina и др., 2018).

В связи с тем, что на современном уровне развития промышленности исключить воздействие загрязняющих веществ на окружающую среду невозможно, необходимы разработки новых и совершенствование существующих технологий восстановления загрязненных объектов окружающей среды.

Целью работы изучение влияния загрязнения ПАУ и тяжелыми металлами на свойства каштановых почв и солонча при различных методах восстановления. Результаты исследования позволят наиболее эффективно подобрать дозы вносимых сорбентов, изучить их действие и последствие, а также разработать рекомендации по применению тех или иных сорбентов в условиях высокого и сверхвысокого уровня техногенного загрязнения почв на примере двух предприятий, вносящих существенный вклад в загрязнение почв юга России.

Объекты и методы

Основным типом зональных почв на территории биосферного заповедника «Ростовский» являются каштановые почвы. Заложены почвенные разрезы на участках «Стариковский» и «Краснопартизанский». Основными формами рельефа являются овраги и балки. В 5 км на юго-восток от участка «Стариковский» в Ремонтненском административном районе находится участок «Краснопартизанский». Осуществлен отбор проб почвы, как на глубину 0-20 см, так и с каждого генетического горизонта. Физические и химические характеристики отобранных образцов почв проанализированы стандартными методами: рН потенциометрическим методом при соотношении почва: вода 1:2,5; величина сухого остатка в водной вытяжке при соотношении почва: вода 1:5 (Воробьева, 2006), при наличии засоления будет определен состав легкорастворимых солей и дана оценка степени и химизма засоления (Панкова, Воробьева, 2006); содержание органического вещества титриметрическим методом (бихроматное окисление по И.В. Тюрину) (Воробьева, 2006); емкость катионного обмена (ЕКО) – по методу М.Ш. Шаймухаметова (1993); содержание обменных катионов – по методу Пфедфера в модификации В.А. Молодцова и И.В. Игнатовой (Мамонтов и др., 2012), содержание карбонатов комплексонометрическим методом по С.А. Кудрину;

гранулометрический состав почвы пипет-методом с пирофосфатной подготовкой пробы, физико-механические свойства (пластичность, усадка) общепринятыми методами на основе взаимодействия с водой (Вадюнина, Корчагина, 1986).

В отобранных образцах почв и растения определены 16 приоритетных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) (нафталин, флуорен, фенантрен, аценафтен, антрацен, аценафтилен, флуорантен, пирен, хризен, бенз(а)антрацен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, бенз(а)пирен (БаП), дибенз(а, h)антрацен, бенз(г, h, i)перилен, индено(1,2,3-сd)пирен) адаптированным методом субкритической водной экстракции, описанном в п.1.2. Определено валовое содержание и рассмотрено профильное распределение тяжелых металлов в почвах каштаново-солонцового комплекса ренгенфлуоресцентным методом с использованием спектрометра «Спектроскан МАКС-GV» Cu, Zn, Pb Cd, Ni и Mn.

Результаты и обсуждение

Модельный вегетационный опыт с каштановой почвой и солонцом с искусственным сочетанным загрязнением ПАУ и Cu

Для разработки методов биоремедиации почв сухостепной зоны при сочетанном загрязнении ПАУ и Cu заложен модельный вегетационный опыт с каштановой слабосолонцеватой почвой и солонцом каштановым с искусственным сочетанным загрязнением ПАУ и Cu. В сосуды объемом 3 л с закрытой дренажной системой помещали по 2 кг почвы, просеянной через сито с диаметром ячеек 2 мм. Для целей текущего проекта эксперимент включал два типа почвы: каштановую слабосолонцеватую и солонец каштановый, используемых в следующей схеме: контроль; CuO 300 мг/кг; CuO 300 мг/кг + 1% биочара; BaП 400 мкг/кг; BaП 400 мкг/кг + 1% биочара; CuO 300 мг/кг + BaП 400 мкг/кг; CuO 300 мг/кг + BaП 400 мкг/кг + 1% биочара, CuO 2000 мг/кг; CuO 2000 мг/кг + 5% биочара + фосфогипс; BaП 800 мкг/кг; BaП 800 мкг/кг + 5% биочара + бактерии - деструкторы; CuO 2000 мг/кг + BaП 800 мкг/кг; CuO 2000 мг/кг + BaП 800 мкг/кг + 5% биочара+ фосфогипс + бактерии - деструкторы; CuO 10000 мг/кг; CuO 10000 мг/кг + 5% биочара+ фосфогипс; BaП 1200 мкг/кг; BaП 1200 мкг/кг + 5% биочара+ фосфогипс + бактерии - деструкторы; CuO 10000 мг/кг + BaП 1200 мкг/кг; CuO 10000 мг/кг + BaП 1200 мкг/кг + 5% биочара+ фосфогипс + бактерии - деструкторы. В качестве сорбента был выбран биочар из шелухи риса в дозах 1% и 5%. Биочар внесен через месяц после инкубации почвы с поллютантами. Опыт проводился при температуре +20-22°C, в условиях близких к естественным. Влажность почвы поддерживалась на уровне наименьшей полевой влагоёмкости. Через месяц инкубации загрязненной почвы с биочаром посеяны широко распространенные на юге России культуры: яровой ячмень двурядный (*Hordeum sativum distichum*) сорта Ратник и томат (*Solanum lycopersicum*) раннеспелого сорта Белый налив 241. Количество растений ярового

ячменя в одном сосуде составило 30 шт, томата – 3 шт. Опыт заложен в 3-х кратной повторности (рис. 1).



Рис. 1. Закладка многофакторного модельного опыта с каштановой слабосолонцеватой и солонцом каштановым, загрязненных БаП (400-1200 мкг/кг) и CuO (300-10000 мг/кг) при внесении биочара из шелухи риса отдельно и в сочетании с фосфогипсом и бактериями ПАУ-деструкторами

Содержание ПАУ и тяжелых металлов в почвах

Установлено, что в незагрязненной каштановой почве под ячменем или томатом содержание БаП и суммы 16 приоритетных ПАУ не превышало 10 нг/г и 370 нг/г, а в солонце – 7 нг/г и 338 нг/г, соответственно (табл. 1, табл. 2).

Таблица 1. Исходное содержание бенз(а)пирена и суммы 16 приоритетных ПАУ в каштановой слабосолонцеватой почве и солонце каштановом, отобранных для проведения модельного вегетационного опыта

Каштановая		Солонец	
БаП	16 ПАУ	БаП	16 ПАУ
9.6±0,6	374.4±10,5	7.0±0,1	337.9±15,2

Доля низкомолекулярных соединений от их суммарного содержания 16 ПАУ в каштановой почве составляет 67%, в солонце – 55%. Внесение БаП дозой 400 нг/г отдельно или совместно с Cu приводит к увеличению суммарного содержания ПАУ в каштановой почве до 729 нг/г и БаП до 391 нг/г, а в солонце до 725 нг/г и 401,2. По мере увеличения дозы внесения поллютантов с 400 нг/г до 1200 нг/г эффект усиливается, особенно в вариантах опыта с солонцом при сочетанном загрязнении

БаП (1200 нг/г) и Cu (10000 нг/г). В данных условиях суммарное содержание ПАУ достигает 1050 нг/г, из которых 1170 нг/г приходится на БаП (рис. 2, 3).

Таблица 2. Элементный состав фосфогипса

Элемент	Единицы измерения	Значение
Na ₂ O		2,7±0,3
MgO		0,67±0,03
Al ₂ O ₃	%	0,09±0,03
P ₂ O ₅		0,86±0,01
CaO		24,93±0,13
TiO ₂		0,100±0,003
Cr		29,20±3,30
MnO		27,09±7,61
Fe ₂ O ₃		0,85±0,02
Ni	мг/кг	1,58±0,29
Cu		72,44±4,60
Zn		29,82±2,70
As		21,62±3,99
Sr		468,76 ±17,32
Pb		35,48±12,96

Внесение БаП в почвы способствует перераспределению группового состава поллютантов в сторону доминирования высокомолекулярных ПАУ. Эффект усиливается при повышении дозы внесения БаП, особенно в солонце в присутствии Cu под культурой ячменя, где наблюдается повышение доли высокомолекулярных ПАУ до 93%.

Внесение ремедиантов способствует уменьшению содержания БаП и суммы 16 ПАУ при любом типе загрязнения каштановой почвы и солонца. За период проведения модельного опыта внесение 1% биочара для почв с низким уровнем загрязнения каштановой почвы (400 нг/г БаП отдельно и в сочетании с 300 мг/кг Cu), 5% биочара в сочетании с бактериями деструкторами для высокого и сверх высокого уровня загрязнения (800-1200 нг/г БаП), а также 5% биочара, фосфогипса и бактерий – деструкторов ПАУ для высокого и сверхвысокого уровня сочетанного уровня загрязнения (800 нг/г БаП + 2000 мг/кг Cu и 1200 нг/г БаП + 10000 мг/кг Cu) позволило снизить содержания БаП на 28-47%. В вариантах опыта с солонцом

внесение ремедиантов менее эффективно, что обусловлено повышенным содержанием солей Na, ограничивающим воздействие естественных и инокулированных на биочаре бактерий – деструкторов ПАУ. При этом наблюдаемое снижение содержание БаП не превышает 37% по сравнению с почвой без внесения сорбентов. Для обоих типов почв снижение уровня загрязнения усиливается по мере уменьшения исходно внесенной концентрации поллютантов и более выражено в вариантах с культурой томата, но затрудняется в присутствии Си. Закономерности снижения суммарного содержания ПАУ в почвах модельного опыта аналогичны снижению БаП (рис. 2, 3). Ремедиация загрязненных почв способствует уменьшению доли высокомолекулярных соединений в составе суммы 16 ПАУ на 11-21% по сравнению с почвами вариантов опыта без применения биочара, фосфогипса и бактерий – деструкторов ПАУ.

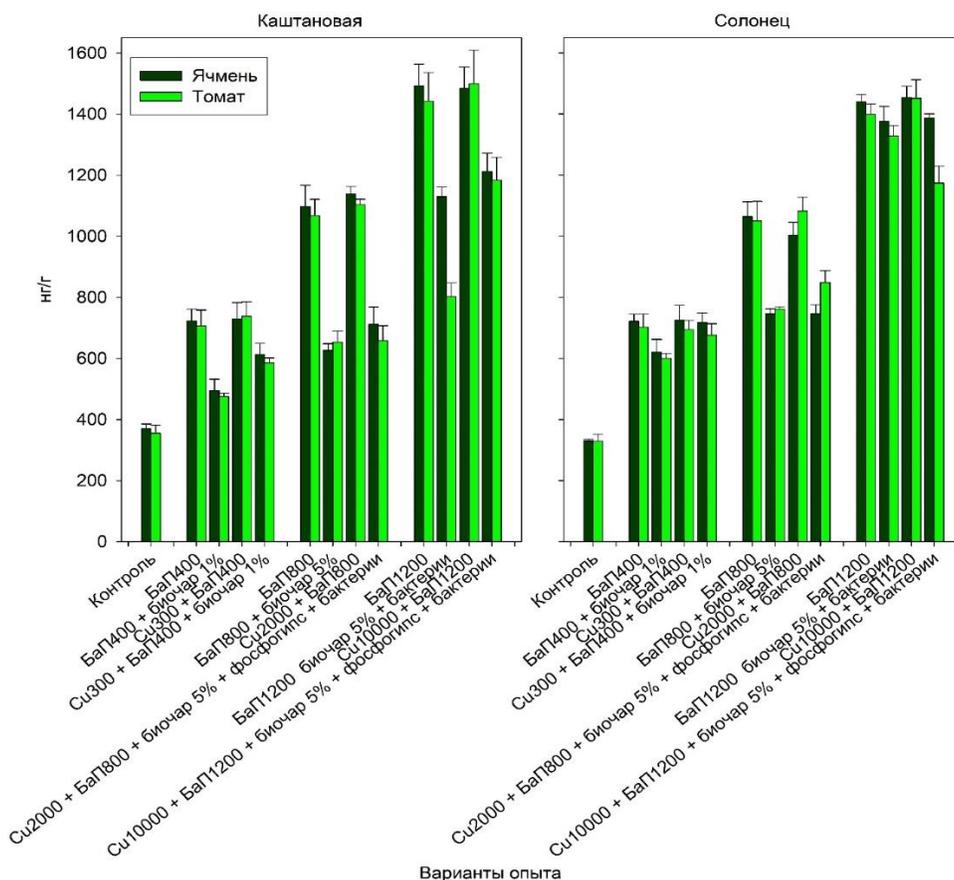


Рис. 2. Суммарное содержание ПАУ в загрязненной каштановой слабосолонцеватой и солонце каштановом в модельном эксперименте с их искусственным загрязнением бенз(а)пиреном отдельно и совместно с Си в различных дозах при внесении ремедиантов и без их внесения

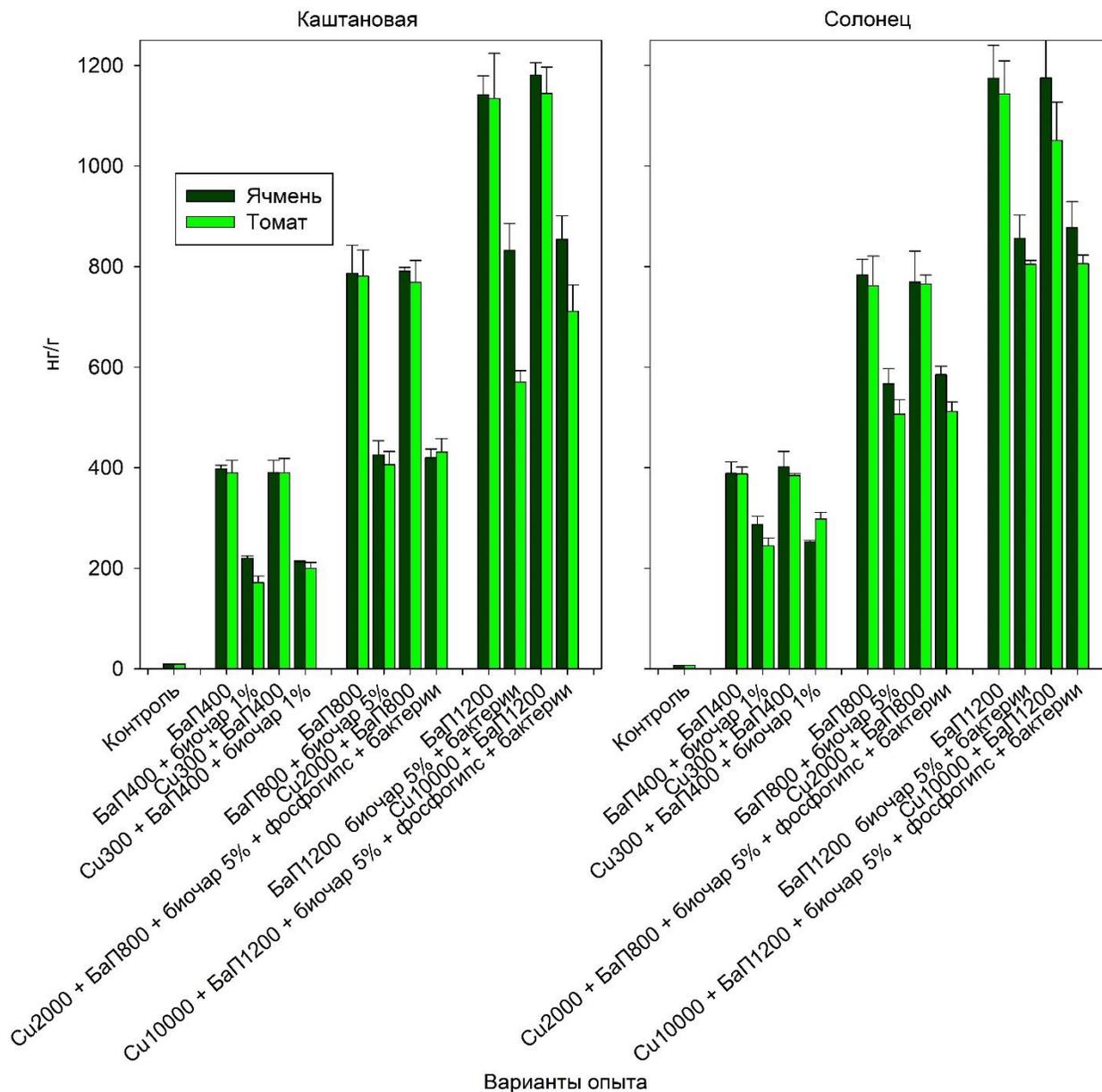


Рис. 3. Содержание бенз(а)пирена в загрязненной каштановой слабосолонцеватой почве и солонце каштановом в модельном эксперименте с их искусственным загрязнением бенз(а)пиреном отдельно и совместно с Cu в различных дозах при внесении ремедиантов и без их внесения

Влияние загрязнения ПАУ и тяжелыми металлами на свойства почв

Установлено, что незагрязненная каштановая почва и солонец относятся к тяжелым суглинкам с содержанием Сорг 1,95% и 1,70%, показатель пластичности – 0,39 и 0,155, гидрофобности – 0,86 и 0,7. Для каштановых почв характерен

сульфатно-хлоридный химизм засоления по анионному составу и кальциево-магниевый по катионному, для солонца - сульфатно-хлоридный и натриево-кальциевый, соответственно. Внесение БаП практически не оказывает влияние на физические и химические свойства почв. Загрязнение почв способствует подкислению рН каштановой почвы до 7,6 в варианте с внесением 10000 мг/кг Си в сочетании с 1200 нг/г БаП и солонца до 7,8 в варианте с внесением только Си. Внесение 5% биочара способствует увеличению рН в большинстве вариантов опыта, достигая 8,4 при ремедиации солонца, загрязненного 2000 мг/кг Си. Применение ремедиантов увеличивает содержание Сорг на 1-8% и 1-10% а ЕКО – на 1-14% и 1-20% у каштановой почвы и солонца по сравнению с вариантами опыта без их применения.

Сравнительный анализ устойчивости чернозема обыкновенного карбонатного, каштановой слабосолонцеватой и солонца каштанового с использованием многофакторного дисперсионного анализа показал, что доза внесения поллютантов, свойства почвы и применение ремедиантов оказывают решающее значение на содержание БаП и суммы 16 ПАУ, валовое содержание Си и подвижность металла. В большей степени влияние рассматриваемых факторов и их сочетание отмечено по группе органических поллютантов. Валовое содержание Си в почвах модельных экспериментов в большей степени зависит от дозы его внесения. Влияние засоления почвы, применения ремедиантов, а также присутствия БаП на содержание непрочно связанных соединений Си уменьшается по мере снижения их подвижности в почве (табл. 3, табл. 4).

Таблица 3. Собственные значения и доля общей объясненной дисперсии по результатам факторного анализа

№ фактора	Собственные значения	% общей дисперсии
1	7.0	36.9
2	6.0	31.6
3	3.4	18.0

Анализ распределения факторных координат на факторной плоскости показал, что относительно факторов 1 и 2, а также 1 и 3 точки на плоскости группируются в зависимости от принадлежности к каштановой почве или солонцу (Рис. 3). Влияние фактора 1 (степени и химизма засоления) распространяется в первую очередь на солонец, загрязненный Си отдельно или в сочетании с БаП, что выражается в повышении подвижности металла. Влияние степени и химизма засоления на подвижность металла снижается при ремедиации почв биочаром в сочетании с фосфогипсом (рис. 4). По фактору 2 наблюдается разделение факторных

координат на факторной плоскости в зависимости от начальной дозы загрязнения почв. При этом с увеличением дозы внесения поллютантов влияние фактора 2 усиливается. Значимость фактора 3, характеризующего устойчивость почв повышается по мере увеличения степени загрязнения почв. Эффект более выражен при загрязнении почвы Си и повышается с внесением биочара и фосфогипса.

Таблица 4. Значения факторных нагрузок различных переменных по результатам факторного анализа

Переменная		Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
БаП		0.05	0.88	0.06
16 ПАУ		0.05	0.90	0.05
Си	Вал	0.09	0.96	0.03
	Обменные	-0.06	0.91	0.21
	Комплексные	0.05	0.97	0.12
	Специфически сорбированные	0.11	0.96	0.07
Свойства почвы	Сорг	0.48	-0.13	-0.74
	pH	-0.34	-0.05	-0.87
	CaCO ₃ , %	0.55	0.13	-0.70
	Плотный остаток, %	0.52	0.08	-0.70
	ЕКО, смоль (экв)/кг	-0.33	-0.24	-0.83
	Ca ²⁺	-0.40	-0.21	-0.65
	Mg ²⁺	0.41	-0.26	-0.79
Состав водной вытяжки	Na ⁺	-0.85	0.14	-0.28
	HCO ⁻³	-0.96	0.02	0.22
	SO ₂ ⁻⁴	-0.96	0.00	0.21
	Cl ⁻	-0.97	-0.13	-0.09
	Ca ²⁺	-0.96	-0.14	-0.01
	Mg ²⁺	-0.92	-0.19	0.01

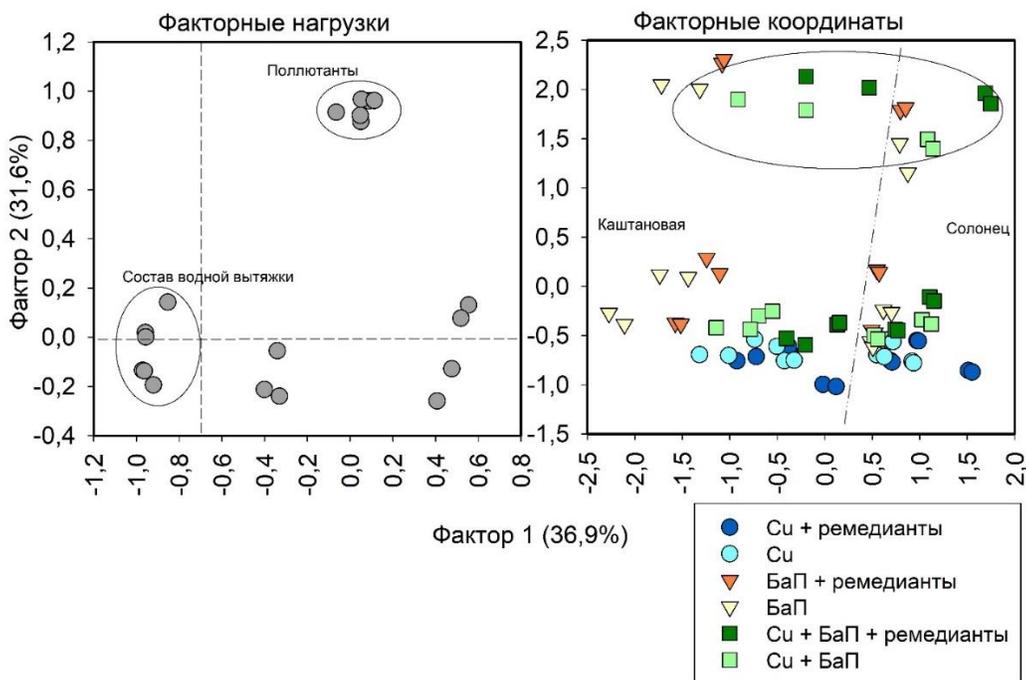


Рис. 3. Факторные нагрузки и координаты относительно факторов 1 и 2 по результатам факторного анализа

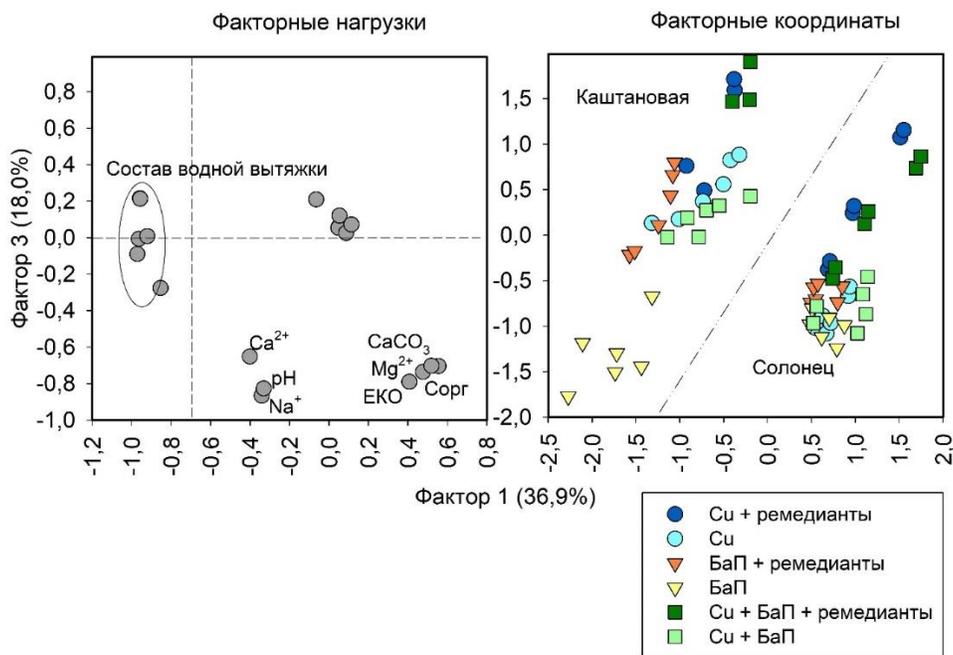


Рис. 4. Факторные нагрузки и координаты относительно факторов 1 и 3 по результатам факторного анализа

Выводы

Показано, что доза внесения поллютантов, свойства почвы и применение ремедиантов оказывают решающее значение на содержание БаП и суммы 16 ПАУ, валовое содержание Си и подвижность металла, что подтверждается результатами анализа устойчивости чернозема обыкновенного карбонатного, каштановой слабосолонцеватой и солонца каштанового с использованием многофакторного дисперсионного анализа. Более характерное влияние рассматриваемых факторов и их сочетание установлено для ПАУ, для содержания меди в почвах модельных экспериментов зависимость установлена в большей степени от дозы внесения металла. Влияние засоления почвы, применения ремедиантов, а также присутствия БаП на содержание непрочно связанных соединений Си уменьшается по мере снижения их подвижности в почве.

Благодарность

Исследование выполнено в лаборатории «Здоровье почв» Южного федерального университета при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение No 075-15-2022-1122.

УДК 631.4

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ВОДОУСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Тарасенко Д.А.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

ushkova_dasha@mail.ru

THE STUDY OF THE MECHANISM OF WATER STABILITY OF THE SOIL STRUCTURE

Tarasenko D.A.

Faculty of Soil Science of Moscow State University

Annotation: There are several opinions in the literature about the mechanism of soil water stability. The aim of the study was to explain the mechanism of water stability of the soil structure. Experiments have shown that water stability is provided by hydrophobic interactions between fractal clusters of humic substances.

Введение

Благоприятное агрегатное состояние почвы – важнейшее условие обеспечения ею плодородия. Декстер (Dexter, 1988) отмечал, что почва должна иметь не только хорошую, но и стабильную структуру по отношению к двум основным воздействиям: (а) способности почвы сохранить свою структуру под действием воды; и (б) способности влажной почвы сохранять свою структуру под действием внешних механических напряжений. При этом предположение о двух видах воздействий – воды и механических сил на водоустойчивость агрегатов однозначно доказано не было (Николаева, 2016). В работах (Verchot et.al., 2011; Николаева, 2016) указано, что агрегатный состав и водоустойчивость агрегатов связаны с органическим веществом почв, его количеством и качеством, но до сих пор не имеется удовлетворительной гипотезы, объясняющей механизмы этой взаимосвязи. Существует мнение (Vogelman et.al., 2013), что водоустойчивость почв обусловлена количеством (плотностью) гидрофобных связей, существующих между почвенными частицами. Согласно предложенному в работе (Милановский, 2009) механизму, гидрофильные участки гуминовых веществ (ГВ) взаимодействуют с глинистыми минералами, а гидрофобные участки взаимодействуют друг с другом, связывая почвенные частицы в агрегате и обеспечивая водоустойчивость. Существует и другое мнение (Шинкарев, Перепелкина, 1997) о механизме формирования водоустойчивых агрегатов – в наиболее агрегированных почвах содержание гидрофильных компонентов ГВ повышено. Таким образом, на данный момент отсутствуют единые представления о механизме формирования водоустойчивости почвенной структуры.

Целью работы являлось уточнение деталей механизма водоустойчивости почвенной структуры.

Объекты и методы

Объекты исследования

В работе использовали образцы гумусовых горизонтов дерново-подзолистой, серой лесной почвы и чернозема типичного.

К исследуемым образцам почв добавляли полимеры:

- ГИПАН,
- ГИПАН+ПДАДМАХ – смесь ГИПАНа и Полидиаллилдиметиламмоний хлорида,
- Полиакриламид (ПАА),
- Полиэтиленгликоль (ПЭГ) с молекулярной массой 300 у.е.,
- Поливиниловый спирт (ПВС),
- Латекст,
- Поливинилпирролидон, $M = 45000-58000$ (К 17),
- Поливинилпирролидон, $M = 70000-90000$ (К 90),
- Поливиниловый спирт (ПВС).

При оценке размера частиц, формирующихся при взаимодействии полимеров с гуматами в водных растворах, использовали водные приготовленные из гумата калия (натрия) из бурого угля ООО «Агротехнологии» (Россия).

Методы исследования

Оценку водоустойчивости агрегатов образцов почвы проводили методом «лезвий», подробно описанном в работе (Ушкова, 2023).

При подготовке образцов почвы высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сита, отбирая агрегаты диаметром 4.5-5 мм. В ходе измерения воздушно-сухие агрегаты помещали в кассету, представляющую собой 3 пары алюминиевых уголков, в нижних частях которых размещены фитили из хлопчатобумажной ткани. В алюминиевые уголки на фитили укладывали по 14 почвенных агрегатов так, чтобы они касались друг друга (рис. 1а). Посредством вакуумирования удаляли из агрегатов воздух в течение 15 минут при разрежении 15 кПа.

После увлажнения агрегатов в вакууме кассету извлекали из эксикатора и помещали в расположенную на весах емкость с водой таким образом, чтобы фитили агрегатов обеспечивали сохранение насыщения агрегатов водой, достигнутое на этапе вакуумирования (рис. 1б). Затем на линейно расположенные агрегаты помещали устройство, представляющее собой два параллельно расположенных лезвия, закрепленные на площадке, на которую устанавливали стаканчик с мерной шкалой. Добавляя песок в стаканчик, повышали нагрузку на агрегаты, которую фиксировали при помощи весов. Луч лазера, закрепленный на другом штативе, направленный на мерную шкалу стаканчика, позволял хорошо контролировать процесс разрушения агрегатов.

С целью стандартизации получаемых данных рассчитывали предельное сопротивление разрушения агрегатов. Экспериментально определяемую нагрузку в граммах выражали в миллиньютонх (мН). Для получения удельной характеристики нагрузки делили на общее количество агрегатов в повторности – 28 штук.

Эксперименты проводили в шестикратной повторности с последующей статистической обработкой результатов.

Отметим, что коэффициент корреляции между значениями устойчивости водонасыщенных агрегатов, полученных с помощью метода “лезвий”, и водоустойчивостью по методу мокрого просеивания составляет свыше 85% (Ушкова и др., 2023), что позволяет использовать метод лезвий не только для оценки механической прочности агрегатов, но также их водоустойчивости.

Электронно-микроскопическое исследования проводили при помощи растрового электронного микроскопа JEOL-6060A лаборатории экологического почвоведения (фирмы “JEOL”, Япония) с вольфрамовым катодом при ускоряющем напряжении 2–5 кВ. Суспензии разбавляли в 10 раз, 5 мкл наносили на атомно-гладкую поверхность слюды и высушивали. На образцы перед исследованием напыляли золото, используя установку JFC1600 (фирмы «JEOL», Япония).

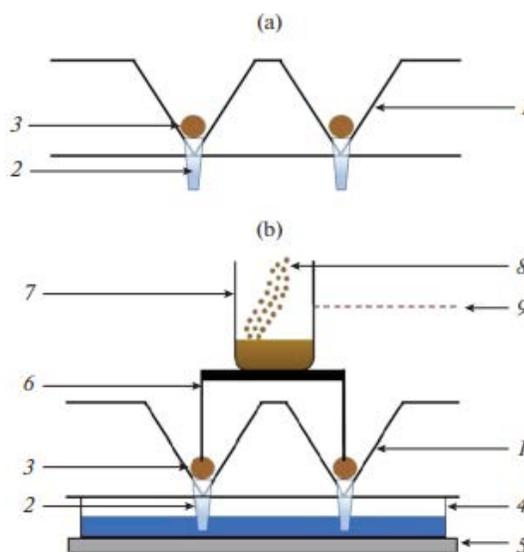


Рис. 1. Схема кассеты с фитилями и агрегатами для определения устойчивости почвенных агрегатов (а) и общая схема определения устойчивости почвенных агрегатов (б): 1 – уголки кассеты; 2 – хлопчатобумажные фитили; 3 – почвенные агрегаты; 4 – емкость с водой; 5 – весы; 6 – площадка с закрепленными на ней лезвиями; 7 – мерный стаканчик с песком; 8 – добавляемый в мерный стаканчик песок; 9 – луч лазера, направленный на мерную шкалу стаканчика.

Метод лазерной дифрактометрии использовали для изучения размера частиц в растворах гуматов с полимерами. Процедура подготовки образца включала приготовление раствора смеси гумата из бурого угля и полимера с соотношением по концентрациям 5:1 соответственно (0,1 г/100 г гумата и 0,02 г/100 г полимера). Размеры частиц в суспензиях определяли при помощи лазерного дифрактометра Mastersizer 3000 фирмы Malvern (Великобритания).

Для оценки эффективности полимеров при их внесении во влажные и воздушно-сухие почв на каждый агрегат чернозема влажностью 31% из пипетки наносили по 10 мкл полимерного состава с концентрацией 0,02 г/100 г раствора. Затем образцы помещали в эксикатор и выдерживали неделю над насыщенными парами воды. Для воздушно-сухих образцов процедура приготовления была аналогичной. Отличие состояло в том, что обработанные и выдержанные неделю над насыщенными парами воды воздушно-сухие образцы перед экспериментом высушивали.

Результаты и обсуждение

Для проверки возможности существования отдельного влияния на водоустойчивость почвенных агрегатов воды и механических воздействий мы решили использовать метод “лезвий”, меняя время контакта агрегатов с водой перед определением водоустойчивости. Было изучено влияние времени взаимодействия агрегатов почв различных типов с водой на величину их водоустойчивости. Результаты представлены на графике (рис. 2). Из полученных данных хорошо видно, что при увеличении времени контакта агрегатов всех изученных почв с водой их водоустойчивость экспоненциально снижается, что подтверждает предположение Декстера (Dexter, 1988). Следовательно, вода без механического воздействия оказывает влияние (снижает) водоустойчивость почвенной структуры.

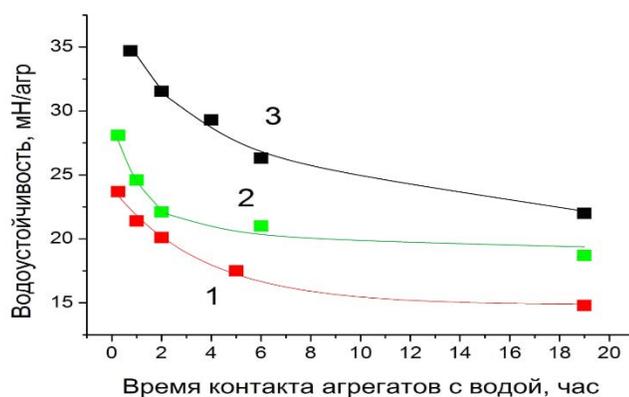


Рис. 2. Изменение водоустойчивости почвенных агрегатов при увеличении времени контакта агрегатов с водой перед определением водоустойчивости. 1 – дерново-подзолистая почва; 2 – серая лесная почва; 3 – чернозем.

Объяснять подобное снижение водоустойчивости принято влиянием расклинивающего давления (Дерягин, Чураев, 1984). Механизм разрушения внутриагрегатных связей обусловлен расклинивающими свойствами водной пленки, заключенной между частицами почвы. Для проверки наличия влияния расклинивающего давления воды на водоустойчивость на черноземе, серой лесной и дерново-подзолистой почвах было проведено определение водоустойчивости в 0,1 и 1 н растворах хлорида калия.

При существовании значимого влияния расклинивающего давления водоустойчивость образцов при таком определении должна была превышать водоустойчивость, измеренную в воде. Однако различий водоустойчивостей мы не обнаружили (табл. 1). Это свидетельствовало о том, что, несмотря на привычность представлений о значимом влиянии расклинивающего давления на водоустойчивость, это не соответствует действительности.

Таблица 1. Водоустойчивости почвенных агрегатов методом «лезвий» в воде и водных растворах хлорида калия, мН/агрегат.

Почва	Вода	0,1 н раствор хлорида калия	1 н раствор хлорида калия
Дерново-подзолистая почва	23,75±0,86	23,71±1,32	23,87±1,55
Серая лесная почва	28,12±2,49	27,67±0,93	27,31±0,77
Чернозем типичный	34,73±0,88	34,32±1,37	34,10±1,33

Для того чтобы объяснить механизм снижения водоустойчивости, мы решили использовать представления о надмолекулярной организации ГВ. Методом малоуглового рассеяния показано (Senesi et al., 1997), что частицы ГВ в растворах образуют фрактальные кластеры (Ф-кластеры) размером 100–200 нм. Этим же методом экспериментально установлена фрактальная организация почв различных типов и при помощи туннельной микроскопии показано, что Ф-кластеры из гумусовых веществ являются структурными элементами, лежащими в основе почвенных гелей (Федотов, Добровольский, 2012). Эти гели связывают почвенные частицы в агрегате между собой. Отмечено, что при помещении чистых поверхностей в почву на них начинают переходить Ф-кластеры, которые, по-видимому, обладают достаточной подвижностью. Поэтому снижение водоустойчивости агрегатов при их контакте с водой может происходить, если Ф-кластеры способны при контакте с водой почвенных агрегатов переходить в нее, снижая количество связей внутри агрегатов. Для проверки этого предположения почвенные агрегаты привели в контакт с водой через хлопчатобумажную ткань и выдерживали в течение 19 ч. Затем воду, которая могла содержать Ф-кластеры,

разбавили, нанесли на поверхность слюды, высушили и изучили полученные образцы при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ).

На полученных микрофотографиях (рис. 3) хорошо видны Ф-кластеры, выделившиеся из всех изученных типов почв. Из полученных данных следует, что Ф-кластеры, составляющие почвенные гели, способны переходить в контактирующую с ними воду, а водоустойчивость почвенных агрегатов в определенной степени обусловлена Ф-кластерами, являющимися основой почвенных гелей. Сопоставляя эту информацию со сведениями из литературных источников по лабильному (растворимому в воде) гумусу, можно предположить, что лабильный гумус, обеспечивающий водоустойчивость почв, может представлять собой Ф-кластеры.

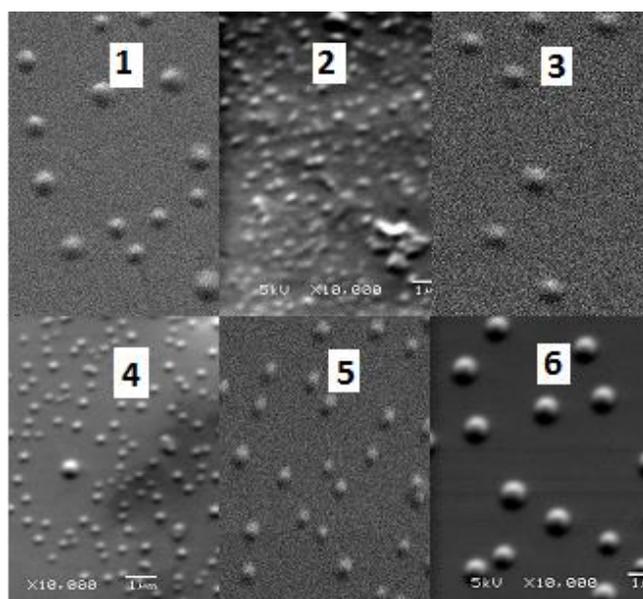
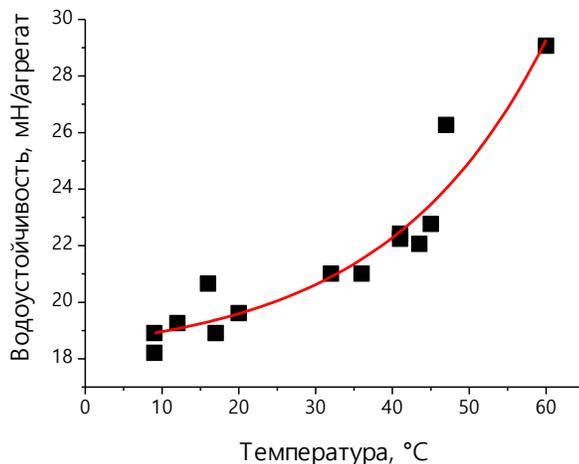


Рис. 3. Ф-кластеры, выделившиеся из разных типов почв. 1- чернозем, 2 – дерново-подзолистая почва, 3 – серая лесная почва.

Для определения типа связей, обеспечивающих водоустойчивую структуру, было изучено влияние температуры на водоустойчивость. Кассету с образцами (после вакуумирования и капиллярного увлажнения агрегатов) помещали под инфракрасную лампу для их нагревания или в холодильник для охлаждения. Предотвращение высыхания агрегатов достигали путем поддержания их капиллярного контакта с водой через фитили. Измерение водоустойчивости проводили одновременно с определением температуры. На первом этапе исследования изучали почвенные образцы, не подвергавшиеся высушиванию до воздушно-сухого состояния. Было установлено (рис. 4-6), что водоустойчивость агрегатов исходных образцов всех типов почв повышалась с ростом температуры.

При остывании агрегатов до комнатной температуры их водоустойчивость снижалась до начальных значений. В ходе измерения водоустойчивости почвенных агрегатов при пониженных температурах ее значения уменьшались. Эти результаты подтвердили предположение о том, что в основе механизма водоустойчивости почв, не подвергавшихся высушиванию, лежат гидрофобные связи.



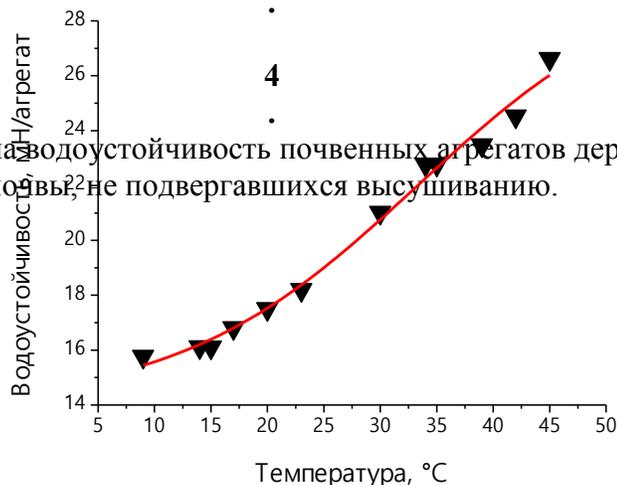
Р
и
с

•

4

•

Влияние температуры на водоустойчивость почвенных агрегатов дерново-подзолистой почвы, не подвергавшихся высушиванию.



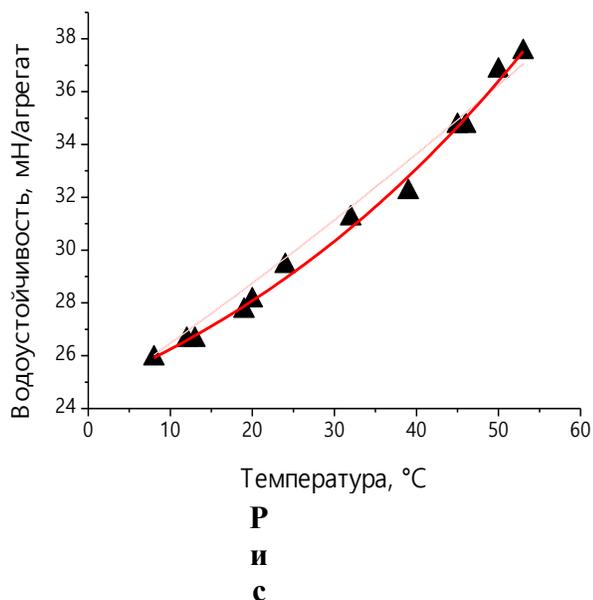
Р
и
с

•

5

•

Влияние температуры на водоустойчивость почвенных агрегатов серой лесной почвы, не подвергавшихся высушиванию.



На втором этапе работы определяли влияние температуры на водоустойчивость агрегатов, которые были предварительно высушены до воздушно-сухого состояния. Хорошо видно, что данное свойство для ⁶ всех изученных почв не соответствовало результатам, полученным для исходных почв (ни на количественном, ни даже на качественном уровне) – водоустойчивость оставалась практически неизменной (рис. 7).

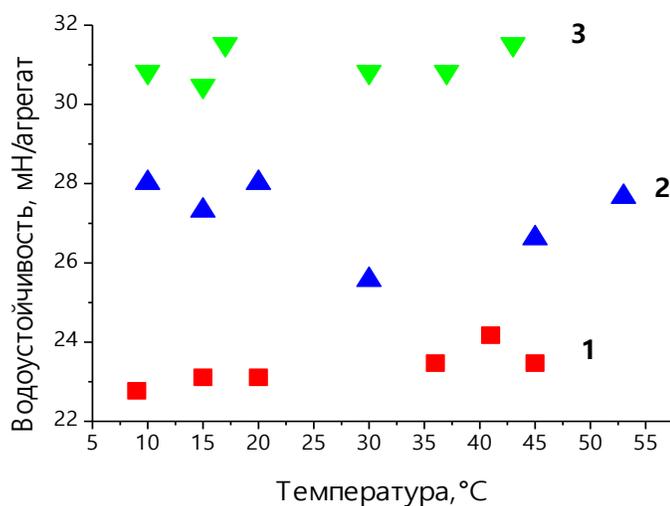


Рис. 7. Влияние температуры на водоустойчивость воздушно-сухих агрегатов. 1-дерново-подзолистая почва, 2 – серая лесная почва, 3 – чернозем.

Принимая во внимание, что прочность гидрофобных связей при повышении температуры растет, а гидрофильных связей снижается, полученные данные о неизменности величин водоустойчивости можно объяснить, если предположить совместное участие в водоустойчивости образцов почв, прошедших через стадию высушивания до воздушно-сухого состояния, как гидрофобных, так и гидрофильных связей. Фактически эти результаты свидетельствуют о сильном изменении структурной организации почв при высушивании.

Так как в литературе (Шинкарев, Перепелкина, 1997; Милановский, 2009) известно, что в формировании водоустойчивости ведущее значение принадлежит органическому веществу, для дополнительного подтверждения роли гидрофобных связей в образовании водоустойчивых агрегатов был проведен модельный эксперимент. В растворы гуматов внесли полимеры: ПЭГ, ПАА, ПВС. Данные полимеры отличаются степенью гидрофобности. Далее при помощи лазерной дифрактометрии изучали размер частиц в полученных растворах. Если именно гидрофобные связи определяют формирование водоустойчивых агрегатов, то самый большой размер частиц будет наблюдаться в растворе гумата с ПВС – самым гидрофобным полимером. Результаты, представленные на графике (рис. 8), подтверждают данное предположение.

Ведущая роль гидрофобных связей в формировании водоустойчивости агрегатов позволяет использовать эту информацию при решении практических задач, в частности, повышении водоустойчивости почв. Степень гидрофобности почв зависит от их влажности, поэтому в исследовании проверили влияние влажности образцов на эффективность составов, используемых для повышения водоустойчивости. Для этого была оценена водоустойчивость воздушно-сухих образцов и образцов, не подвергавшихся высушиванию, обработанных одними и теми же полимерными составами. Обнаружено, что эффективность полимерных составов на воздушно-сухих образцах и образцах, не подвергавшихся высушиванию, отличается (рис. 9). Это говорит о некорректности использования воздушно-сухих образцов при оценке водоустойчивости почв.

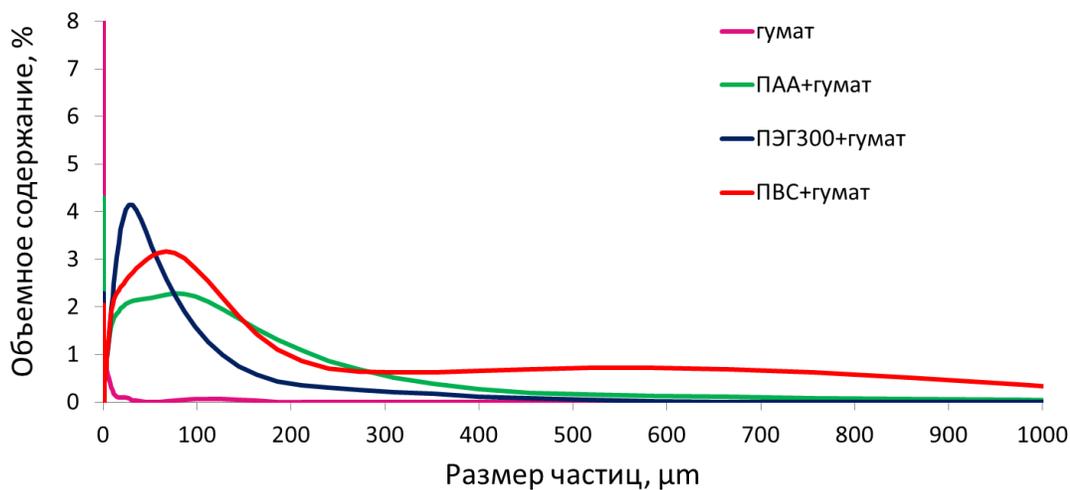


Рис. 8. Размер частиц в растворах гумата с полимерами, определенными на лазерном дифрактометре.

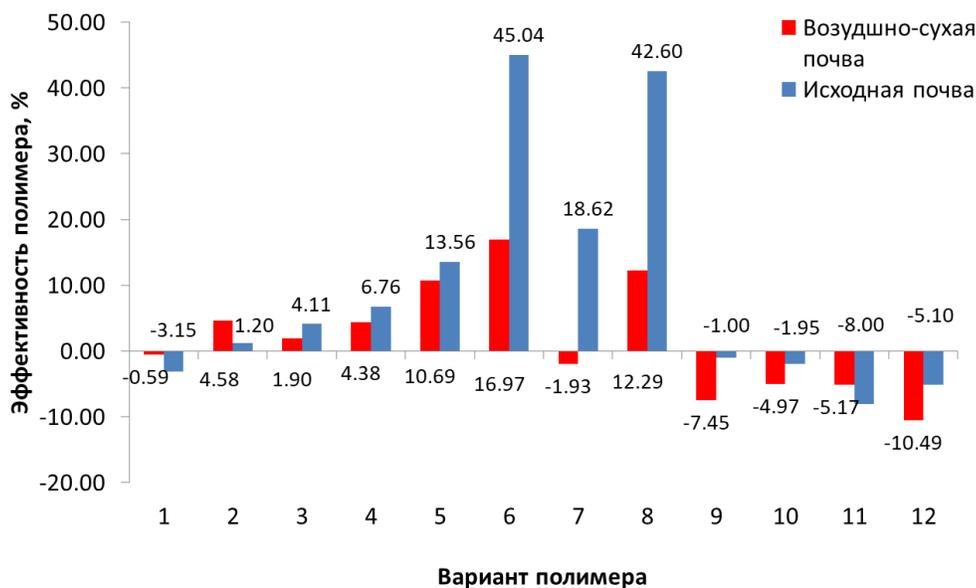


Рис. 9. Эффективность внесения полимеров в почву, не подвергавшиеся высушиванию, и в воздушно-сухие образцы. 1 - К17 0,5%, 2 - К17 1,0%, 3 - К90 0,5%, 4 - К90 1,0%, 5 - ПАА 0,5%, 6 - ПАА 1,0%, 7 - ПАА 0,02%, 8 - ПВС 0,02%, 9 - ПЭГ300 0,02%, 10 - ПЭГ 35000 0,02%, 11 - Латекс 0,2%, 12 - Латекс 0,02%.

При анализе литературы мы отмечали выше, что водоустойчивость почв, с одной стороны, определяется гидрофобными связями, а с другой стороны, в литературе показано (Когут, 1998), что важную роль имеют лабильные

(гидрофильные) компоненты гумуса. Отрицать корректность полученных данных нет никаких оснований. Поэтому можно утверждать, что для повышения водоустойчивости необходимо существование в почве гидрофобных и гидрофильных соединений гуминовых веществ, обеспечивающих наличие в почве связей обоих типов. Объяснение этому может быть дано на основе описанного в работе (Шоба и др., 2023) механизма водоустойчивости, состоящего в образовании гидрофобных связей между надмолекулярными образованиями из гуминовых веществ – фрактальными кластерами (Ф-кластерами), имеющими дендритную структуру. Прочность связи между двумя Ф-кластерами определяется количеством гидрофобных связей между ними: чем больше связей, тем выше устойчивость. Прочные связи между Ф-кластерами могут возникнуть, если они будут взаимодействовать между собой не через точечные гидрофобные контакты на поверхности отдельных “ветвей”, а через множество гидрофобных контактов, возникающих при сцеплении нескольких “ветвей”. Такое взаимодействие возможно только при наличии гидрофильных участков с ионными атмосферами, выполняющими функцию протекторов. Они, подобно одноименно заряженным магнитам, отталкивают “ветви” Ф-кластеров друг от друга, тем самым создавая “коридор”, обеспечивающий более глубокое взаимопроникновение этих “ветвей”. В результате вместо одиночных гидрофобных контактов между отдельными “ветвями” Ф-кластеров между ними возникают множественные гидрофобные контакты, значительно повышающие водоустойчивость. В противном случае взаимодействие между Ф-кластерами будет происходить через небольшое число точек на их поверхности, что не может обеспечить высокую водоустойчивость почв.

Выводы

1. Обнаружено снижение водоустойчивости образцов с увеличением времени капиллярного контакта с водой. Предложено объяснение с позиций наноструктурной организации почв.
2. Обнаружено увеличение водоустойчивости почвенных агрегатов с ростом температуры для образцов, не подвергавшихся высушиванию. Это говорит о ведущей роли гидрофобных связей, что в последствии было подтверждено в модельном эксперименте.
3. На почвенных образцах, проходивших стадию высушивания до воздушно-сухого состояния, не обнаружено влияния температуры на водоустойчивость. Для объяснения этих результатов выдвинуто предположение, что при высушивании образцов почв гидрофобные и гидрофильные связи действуют разнонаправленно. При этом по суммарной энергии эти связи оказываются равны, поэтому начинают уравнивать друг друга и значение водоустойчивости остается неизменным.

4. Полученные результаты свидетельствуют об изменении структурной организации почвенных образцов при высушивании и некорректности определения водоустойчивости на этих образцах.

Литература

- Дерягин Б.В., Чураев Н.В. (1984) Смачивающие пленки. М.: Наука, 159.
- Когут Б.М. (1998) Трансформация гумусового состояния черноземов при их сельскохозяйственном использовании. *Почвоведение*, **7**, 794–802.
- Милановский Е.Ю. (2009) Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 186.
- Николаева Е.И. (2016) Устойчивость почвенных агрегатов к водным и механическим воздействиям. Дисс. канд. биол. наук. М., 104.
- Ушкова Д.А., Конкина У.А., Горепекин И.В., Потапов Д.И., Шеин Е.В., Федотов Г.Н. Устойчивость агрегатов пахотных почв: экспериментальное определение и нормативная характеристика. *Почвоведение*, **2**, 203–210. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50404085>
- Федотов Г.Н., Добровольский Г.В. (2012) Возможные пути формирования нано- и микроструктур в гумусовых веществах почвенных гелей. *Почвоведение*, **8**, 908–920. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17794210>
- Шинкарев А.А., Перепелкина Е.Б. (1997) Содержание и состав гумусовых веществ в водопрочных агрегатах темно-серой лесной почвы. *Почвоведение*, **2**, 165–172.
- Шоба С.А., Шеин Е.В., Ушкова Д.А., Грачева Т.А., Салимгареева О.А., Федотов Г.Н. (2023) Физико-химические аспекты водоустойчивости почв. *Доклады Академии Наук. Науки о Земле*, **1**, 139–143.
- Dexter A.R. (1988) Advances in characterisation of soil structure. *Soil Tillage Res.*, **2**, 199–239.
- Senesi N., Rizzi F.R., Dellino P., Acquafredda P. (1997) Fractal humic acids in aqueous suspensions at various concentrations, ionic strengths, and pH values. *Colloids and Surfaces A. Physicochemical and Engineering Aspects*, **127 (1–3)**, 57–68.
- Verchot L.V., Dutaur L., Shepherd K.D., Albrecht A. (2011) Organic matter stabilization in soil aggregates: *Geoderma*, **161 (3–4)**, 182–193.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «CASE-STUDY» ЧЕРЕЗ КОЛЛАБОРАЦИЮ СНО-ВУЗ-РАБОТОДАТЕЛИ В МГУ ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАПРОСОВ ОРГАНИЗАЦИЙ

Тимофеева Е.А.

Факультет почвоведения МГУ, кафедра химии почв, Москва, Российская Федерация,
helentimofeeva@rambler.ru

EXAMPLES OF STUDENT SOCIETY-UNIVERSITY-EMPLOYERS INTERACTION AT
LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY WITHIN THE FRAMEWORK OF
SOLVING ENVIRONMENTAL CASES OF ORGANIZATIONS

Timofeeva E.

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation,
helentimofeeva@rambler.ru

Annotation: The article is devoted to the application of the "case-study" technology, which contributes to the formation of future competencies among young professionals. Higher environmental education of natural science students in the university-employer dialogue develops systematic and creative thinking, increases motivation to study and increases the demand for graduates in the labor market.

Востребованность на рынке труда к специалистам экологического профиля повышается ежегодно, при этом ряд авторов отмечаю (Борисова, 2016; Дубров, 2020; Ермаков и др., 2015), что интерес к новым профессиям экологического профиля ниже спроса. Подготовка кадров для отрасли требует новых педагогических приёмов, в том числе привлечение работодателя в обучении студентов и трансформации заданий с учетом практических задач. Снижение разрыва между требованиями работодателей и уровнем квалификации выпускника - молодого специалиста повышает их конкурентоспособность (Ермаков, 2015; Клименко, 2019). Несмотря на то, что большинство выпускников находят работу после получения высшего образования, но часто профиль занимаемой должности не соответствует направлению обучения (Борисова, 2016; Дубров, 2020; Ермаков и др., 2015).

В современных условиях повышается значимость целевой подготовки и коллаборации работодатель-вуз, с учетом запроса первого перед образовательным учреждением ставится четкая цель по подготовке профессионала для конкретных задач. При этом диалог работодатель-вуз в большинстве случаев не выстроен, можно отметить следующие проблемы взаимодействия:

- разрыв между запросом работодателей и компетенциями выпускников вузов, рост недоверия к вузу, собственные учебные центры компаний

- нечеткие формы взаимодействия вуз-организация
- профстандарты разработаны не для всех специальностей
- низкий уровень адаптация фундаментальных знаний к практике
- недостаточное оснащение материально-технической базы;
- нехватка высококвалифицированных преподавателей;
- проблема формирования исследовательских, проектных и метапредметных компетенций студентов, а также softskills

В отчёте форума "Будущее трудоустройства" в Давосе приводится перечень первостепенных навыков: комплексное решение проблем, критическое мышление и анализ информации, креативность, оригинальность и умение проявлять инициативу, управление людьми и координация действий с другими, эмоциональный интеллект, составление суждений и принятие решений, ориентация на обслуживание, взаимодействие, ведение переговоров, когнитивная гибкость. Решение данной задачи возможно с помощью анализа конкретных ситуаций – метода активного проблемно-ситуационного анализа, основанного на обучении путем решения конкретных задач – ситуаций (решение кейсов). Цель метода - совместными усилиями группы студентов проанализировать ситуацию, возникающую при конкретном положении дел в организации, выработать практическое решение; окончание процесса – оценка предложенных алгоритмов и выбор лучшего в контексте поставленной работодателем проблемы.

Кейсы по запросам организаций можно условно разделить на 4 группы:

- Кейсы долгосрочного исполнения: решение запроса организации через дипломное проектирование
- Кейсы-конкурсы: решение запроса организации в формате конкурса между командами студентов
- Кейсы-разборы: решение запроса организации в формате производственной практики студентов
- Разовые кейсы.

Разовое касание – более простой, но менее эффективный формат взаимодействия, среди них можно выделить следующие:

- Лекция представителя работодателя (например, в рамках научного клуба студенческого научного общества (СНО))
- Мастер-класс для и(или) от работодателя
- Деловая игра
- Конференция
- Волонтерство в рамках мероприятий
- Жюри конкурсов, работодатель- член аттестационных комиссий
- Экскурсия на предприятие (в организацию)
- Консультация
- Ментор (работодатель) и менти (студент)

Кейсы долгосрочного исполнения являются решением проблемы работодателя в формате выпускной квалификационной работы, НИР, прототипа стартапа и т.д. Через научные исследования студентов организация получает возможность снизить свои затраты на реализацию запроса и одновременно закрыть свой вопрос. Из недостатков подхода можно отметить длительность выполнения.

Кейсы-разборы позволяют получить результат в более сжатые сроки – до полугода, здесь предполагается формат стажировки, практики или деловой игры. Предприятия заинтересованы в подобных вариантах сотрудничества, поскольку решение конкретных примеров позволяет снизить экологические риски объектов, а практические рекомендации могут усовершенствовать технологии производства.

Кейсы-конкурсы требуют от 1 до 2 месяцев подготовки и до 3 месяцев на проведение. Подготовительный этап включает: 1) набор команд, участники могут быть из разных вузов любых направлений подготовки 2) формулировка правил и этапов конкурса, выбор платформы и формата проведения 3) согласование призов (денежных, мерч компаний, стажировка и т.д.) 4) определение перечня членов жюри - экспертов из организаций, которые предоставили кейсы и вуза.

Каждый из представленных форматов кейсов предполагает активное участие в подготовке, подборе исполнителей, волонтеров и экспертов при организации работы представителей СНО, СКБ и других молодежных организаций. Участники и руководители СНО – прямые благополучатели результатов взаимодействия с работодателем, при этом их объем работы снижает нагрузку на преподавателей и администрацию. Также СНО и СКБ могут получить грант на проведение мероприятий от Росмолодежи и других организаций.

Если компания хочет работать со студентами, то ей необходимо:

1. Выписать проблемы(боли) или идеи (желания), которые ей необходимо решить (реализовать), и распределить их по срочности (срочные, среднесрочные, долгосрочные).

2. Написать в профильные ВУЗы запрос на заключение договора о сотрудничестве, в договоре прописать форматы возможных взаимодействий в рамках тем и сроков, а также контактное лицо-куратор организации от ВУЗа.

3. С куратором от ВУЗа тезисно описать каждую проблему/идею по целям, задачам, способам решения, форматам проведения, результатам, срокам и распределению ответственности за этапы.

4. Компании посмотреть, что она может предложить студенту/вузу/куратору, кроме участия в решении проблемы организации: оплату работы, проживание, питание, экскурсионную программу, страховку, совместные статьи, стажировку и т.д.

Навыки, полученные при взаимодействии с работодателем, в том числе с помощью метода «case-study», способствуют формированию компетенций будущего у молодых профессионалов.

Литература

- Борисова Е. В., Пузырев Н.М. (2016) Вопросы взаимодействия работодателей и вуза в подготовке бакалавров направления "Техносферная безопасность". *Современная наука* **2**, 33-38.
- Дубров Д.В., Кочетков М.В., Стеглянников В.Ю. (2020) Работодатель как фактор студентоцентрированного образования: опыт реализации. *Высшее образование в России* **29(11)**, 141-152.
- Ермаков А. С., Ермаков Д. С., Шевченко М. А. (2015) Экологические профессии будущего: теория и практика. *Экологическое образование: до школы, в школе, вне школы* **1**.
- Ермаков Д. С. (2015) Экологические профессии в XXI веке. *Вестник экологического образования в России*. **1**, 22-25.
- Клименко И. С. (2019) Деловые игры, имитационные упражнения, кейсы: Учебник, электронное издание сетевого распространения. Северо-Кавказский федеральный университет. – Москва: ООО "Издательский дом КДУ", 128 с.

USAGE OF GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS IN DIGITAL SOIL MAPPING; A CASE STUDY OF YESILTEPE-AKSARAY-TURKIYE

Tusat, E.^a, Er, F^b, Mikailsoy, F^c

^aKonya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Geomatics Engineering, Konya, Turkiye, etusat@ktun.edu.tr

^bSelcuk University, Cumra Vocational School, Cumra-Konya, Turkiye, fatiher@selcuk.edu.tr

^cIgdir University, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science, Igdir, Turkiye, farizmikayilov@gmail.com

Annotation: Safety food production with high yield per unit area is one of the most important issues of our time. For this purpose, there are many technological applications called precision agriculture (PA) today. In variable level agricultural applications where GPS and GIS are used together, it provides economic production opportunities for appropriate crop selection, fertilization, plant nutrition, pest control. The basic component of these applications is digital soil mapping. In this study, digital soil mapping was created for some elements in the GIS platform in Yesiltepe town of Aksaray province in Turkiye. Soil surveying conducted within the scope of Yesiltepe land consolidation project were used in the application. Maps of related elements were prepared for 0-30, 30-40, 40-50 cm soil depths.

Introduction

Despite the increasing world population, limited agricultural land leads people to apply methods that will get maximum yield from minimum area. The importance of the issue increases even more with the acceleration of the misuse of fertile agricultural land by people (Karakus et al., 2019). On the other hand, safe access to food resources for the growing population is one of the basic elements for healthy societies. In particular, the use of chemical fertilizers and pesticides is a vital issue in terms of both soil protection and healthy organic production. However, developing technological opportunities are also closely related to the agricultural sector. Some of these practices, known as precision agriculture (PA) practices, are shown in Fig. 1. The most important of these applications is Geographical Information Systems (GIS). A Geographical Information System (GIS) is a computer system that analyzes and displays geographically referenced information (URL1). The use of GIS in agriculture can be considered under three headings: strategic planning, water management and crop suitability mapping (URL2). On the other hand, site-specific management, yield monitoring, variable rate application, remote sensing, GPS and GIS, automated systems are some of the basic concepts of precision agriculture (URL3).

Soil mappings are the most important resource used by sectors such as agriculture, forestry, environment and urbanization that use soil data in their projects and activities (Guler E., 2020). Soil is the basis of agricultural production and its basic properties should

be known for a sustainable and efficient production (Mercan and Arpag, 2020). In recent years, digital soil mapping (DSM) methods have been actively used to study and mapping of soils and their properties (Suleymanov et al., 2021). The physical and chemical properties of the soil and their spatial analysis by associating them with location information are the main data source for effective and efficient irrigation, fertilization, spraying, etc.

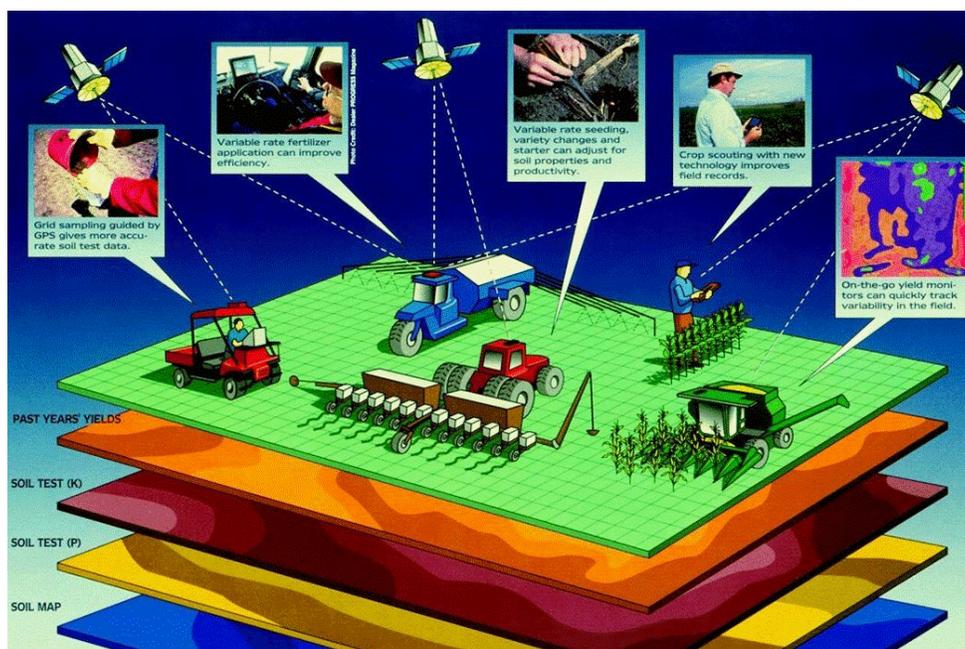


Fig. 1: GIS in Agriculture: Map layers such as soil chemistry, soil type and topography (and derived maps such as soil drainage), previous yields, etc, can provide important information for field management (URL2)

Material and methods

In this study, it was aimed to mapping the soil elements obtained according to the laboratory analysis results for different depths using GIS techniques. The sample database design developed by Sari et al. (2014) used in this study and the relationships between feature class and feature table are shown in Fig. 2.

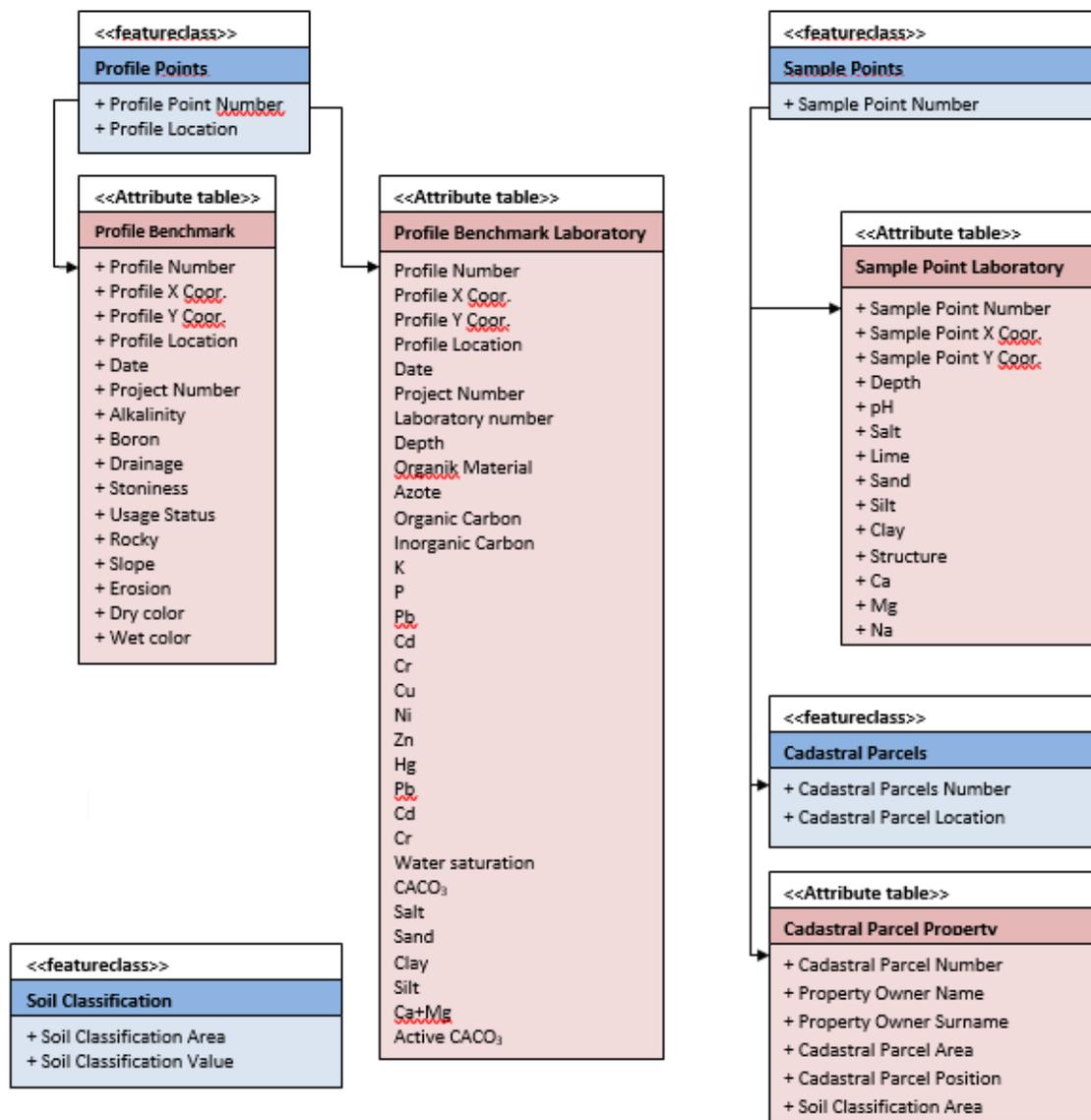


Fig. 2. Sample database design and relationships between feature class and attribute table

The research area is the neighborhood of Yesiltepe district of the Aksaray province in Turkiye (Fig. 3). Yesiltepe land consolidation project was implemented by Konya Regional Directorate of State Hydraulic Works. The data used in this study were generated within the scope of Yesiltepe land consolidation project. The 62 sample points were also measured in the field in geographical coordinates in the WGS system with GNSS. In this way, soil analysis results and location information were correlated.

ARCGIS 10.8 software was used for soil mapping. As a result of laboratory analysis, B, Lime, Ph, Salt, SAR, Saturation values were obtained for 0-30, 30-40, 40-50 cm depths

at 62 points. For soil mapping purposes, the coordinates of these 62 points and Boron (B), Lime, Ph, Salt, SAR, Saturation values for 0-30, 30-40, 40-50 cm depths were transferred to the database. Firstly, a soil maps were created for 0-30 cm B value. IDW (Inverse Distance Weighted) interpolation method was used in all mapping. Then, lime, Ph, salt, SAR, saturation maps were created for 0-30 cm, respectively (Fig. 4). In the next stage, maps were created for 30-40 cm according to all elements (Fig. 5), and then maps were created for 40-50 cm (Fig. 6).

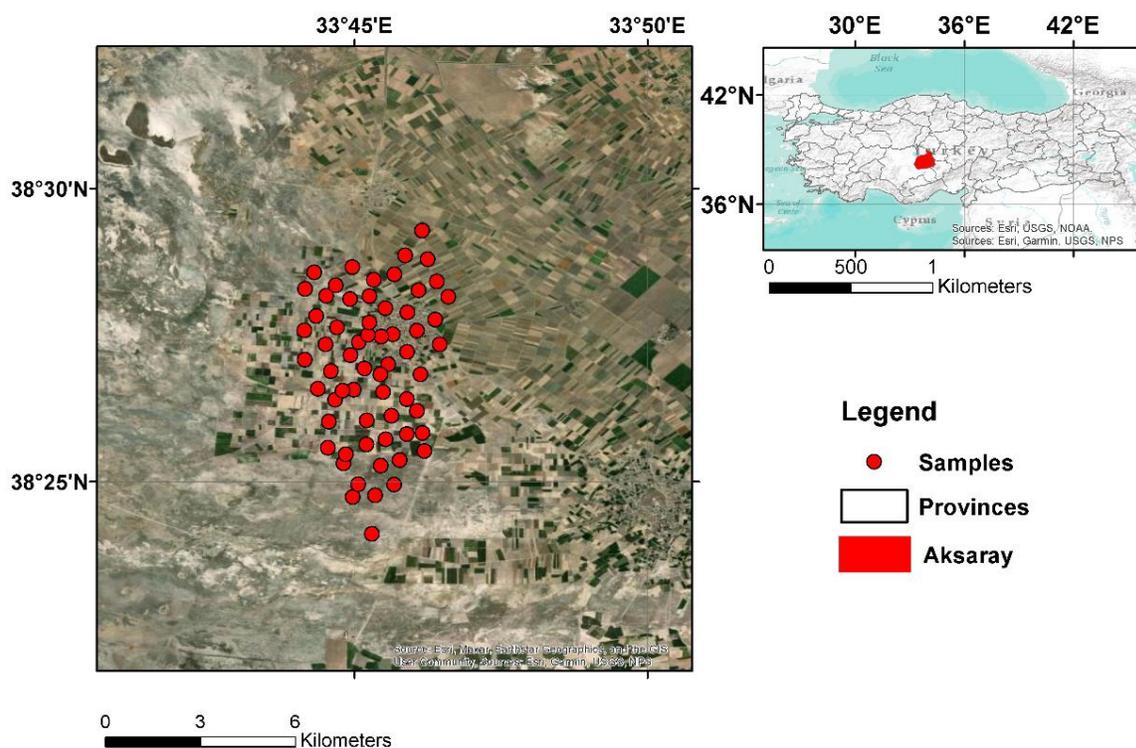


Fig. 3: Study area boundaries

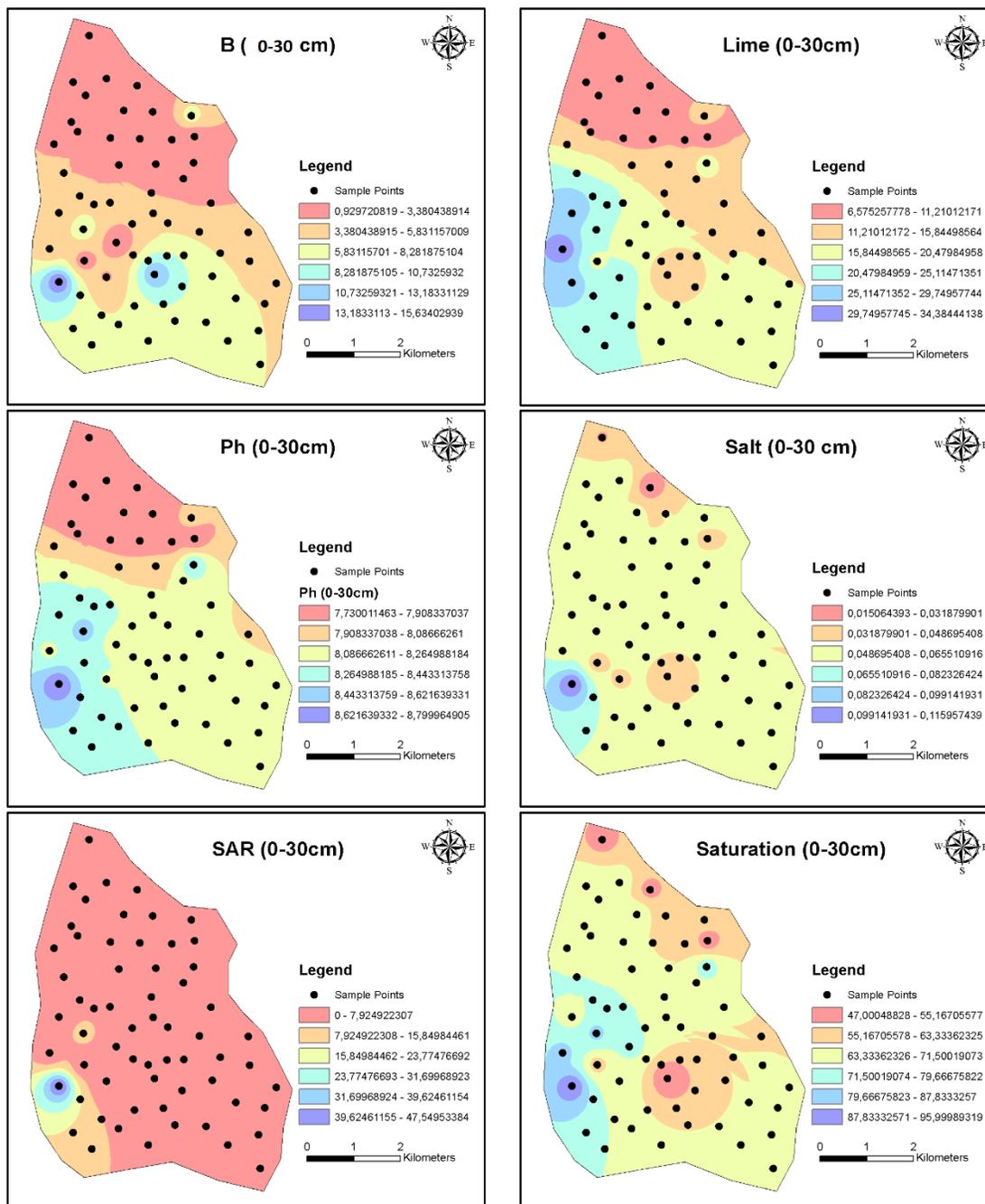


Fig. 4: Maps of soil surveying in 0-30 cm depth

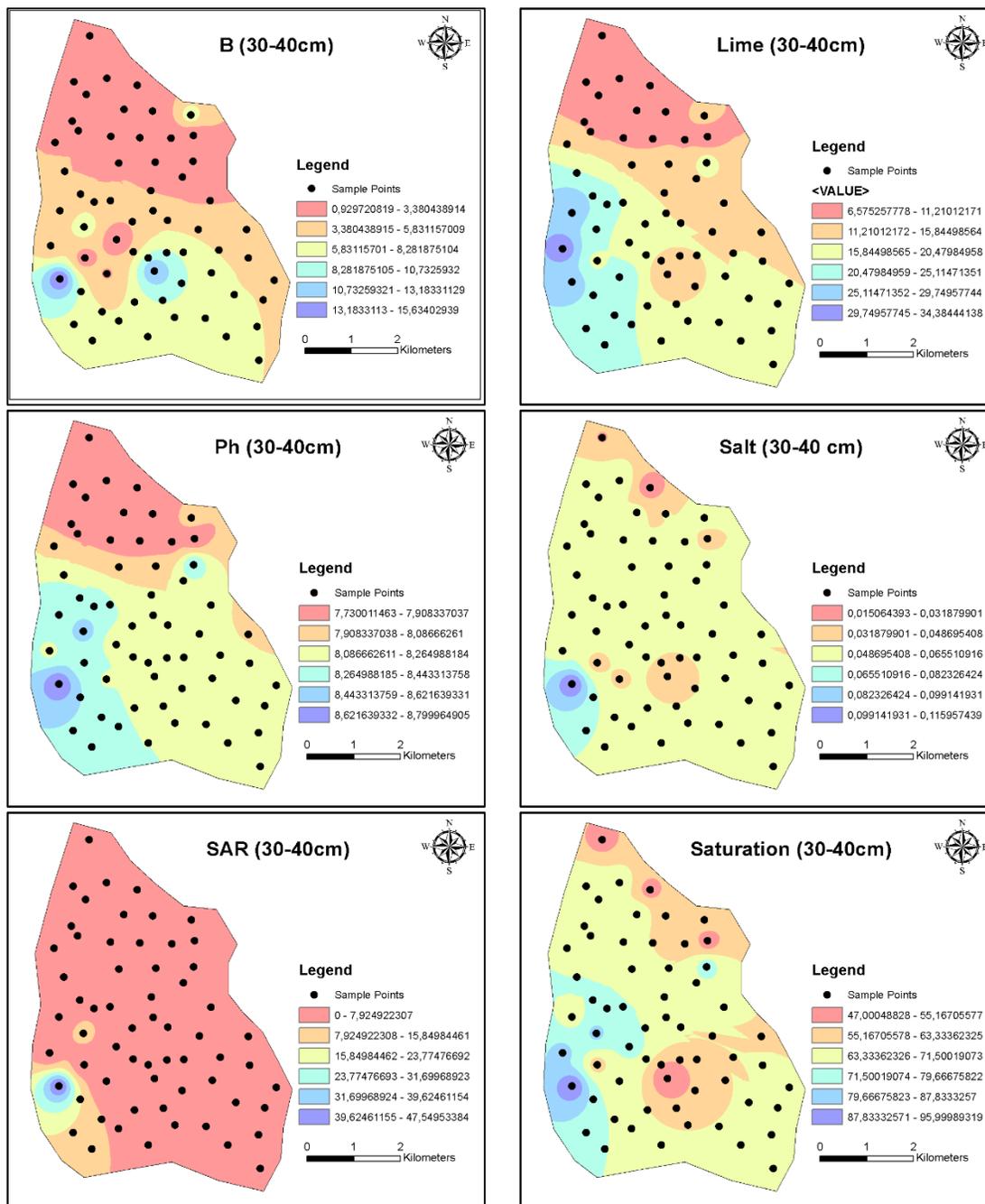


Fig. 5: Maps of soil surveying in 30-40 cm depth

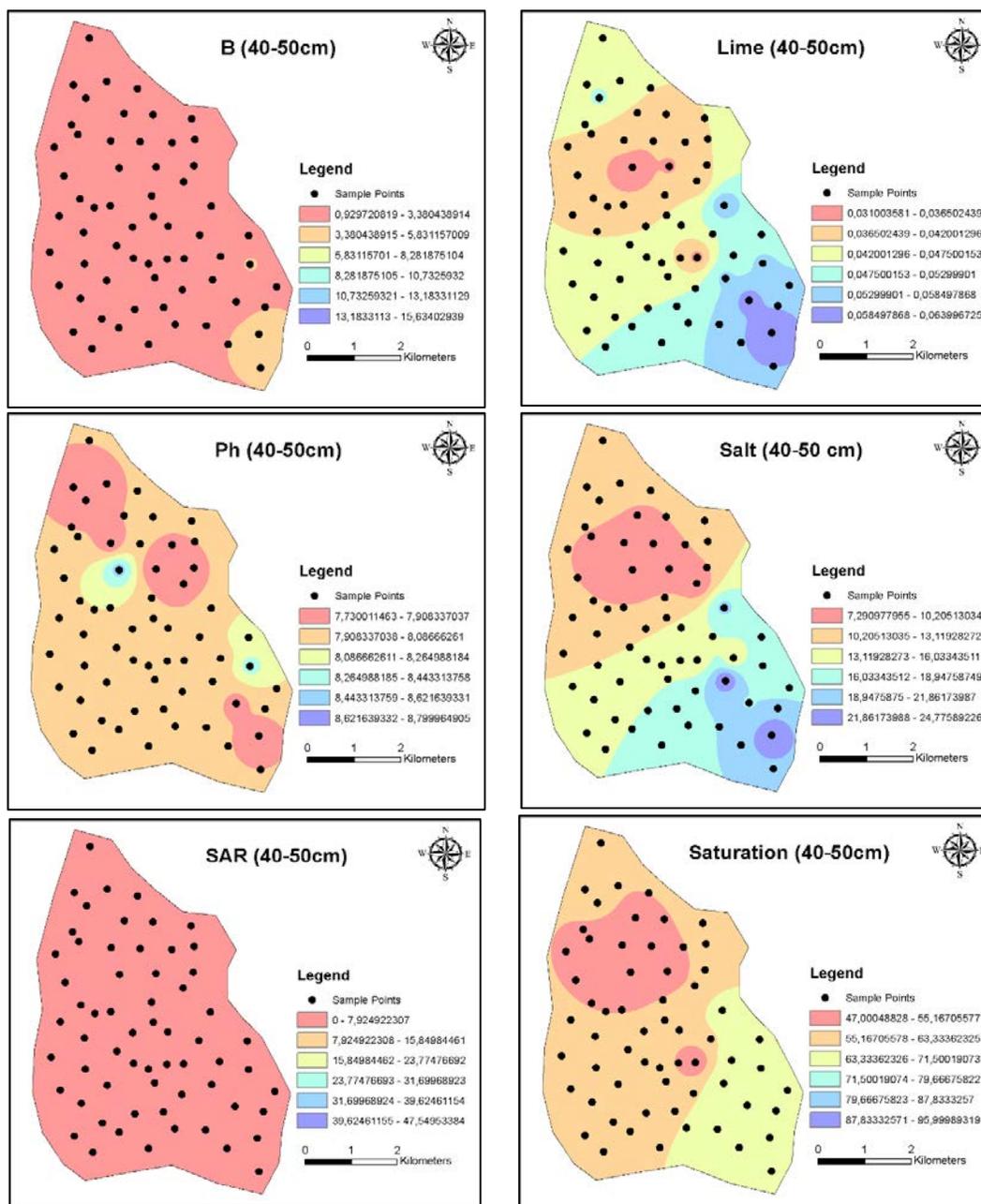


Fig. 6: Maps of soil surveying in 40-50 cm depth

Results and Discussion

Issues such as increase in agricultural production and safety food have led to a wide range of applications of precision agriculture (PA) practices in agricultural production. Variable Rate Application Technologies (VRAT) implementations both reduce input costs and ensure safety food production. In this context, it is necessary to know many soil

properties of the agricultural land where production will be carried out. It is important to store this information digitally in GIS platform and integrate it with different data sources. Soil maps prepared for different components in GIS software constitute the basis of these applications. Soil maps obtained in this study are one of the main data sources for production planning, fertilization and plant nutrition. As a result of these interpretations, it is understood that it will help in many issues such as appropriate product selection, increasing agricultural production, reducing unnecessary chemical use and reducing cultivation costs.

Acknowledgements

Authors would like to thank the Konya Regional Directorate of State Hydraulic Works for providing the data used in this study and their technical support.

References

- Guler, E., (2020), Toprak Haritalama Çalışmaları İçin Web Tabanlı Mobil Cbs Tasarımı, Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, (In Turkish)
- Karakuş, K.; Karakuş, S.; Çelikyürek, H. (2019). Ülke Toprakları ve Tarım Arazilerinin Bitkisel ve Hayvansal Üretim Faaliyeti Dışında Kullanımı. *Hayvan Bilimi Ve Ürünleri Dergisi*, **2(1)**, 84-90, (In Turkish).
- Mercan, C.; Arpag, S. (2020). Coğrafi Bilgi Sistem Analizleri Kullanılarak Toprak ve Arazi Özelliklerinin Değerlendirilmesi: Türkiye, Mardin İli Arazisi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, **7(1)**, 23-33. <https://doi.org/10.19159/tutad.644210>, (In Turkish).
- Sari F., Tusat E., Er F. (2014) Developing GIS Based Soil Survey Infrastructure For Land Consolidation For Agricultural Management; A Case Study Seydisehir", *Bulletin Of Altai State Agricultural University*, **6(116)**, 98-103, June 2014
- Suleymanov, A.; Abakumov, E.; Suleymanov, R.; Gabbasova, I.; Komissarov, M., (2021) The Soil Nutrien Digital Mapping for Precision Agriculture Cases in the Trans-Ural Steppe Zone of Russia Using Topographic Attributes. (2021) *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* **10**, 243. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040243>
- URL 1, What is a geographic information system (GIS)?, The United States Geological Survey-USGS, <https://www.usgs.gov/faqs/what-geographic-information-system-gis>, [Accessed date: 05.02.2024]
- URL 2, GIS in Agriculture, <https://gis-university.com/gis-in-agriculture/>, [Accessed date: 05.02.2024]
- URL 3, Precision agriculture, Uses of GIS, GPS, VRA, Geo-informatics, Nano-technology, and Precision Farming, <https://www.agricorn.in/2023/03/precision-agriculture-and-uses-of-gis-gps-and-vra.html>, [Accessed date: 09.02.2024]

УДК : 631.4

СТРУКТУРА ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО МОЩНОГО РАЗНОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

Тюгай З., Салимгареева О.А., Иванов А.В.

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

Zemfira53@gmail.com

salimgareevao@soil.msu.ru; anton.soil@mail.ru

THE STRUCTURE OF THE CHERNOZEM OF A TYPICAL POWERFUL DIFFERENT LAND USE

Tyugai Z., Salimgareeva O.A., Ivanov A.V.

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: The morphological features of the structure of chernozem typical of powerful different land uses were studied: unmown steppe, permanent fallow, arable land, forest belt. Long plowing led to changes in the structural organization both at the meso and macro levels of its organization. The main factor in changing the structure and its functional properties is the transformation of organic matter.

Введение

Структура почвы на агрегатном уровне ее организации формируется в процессе почвообразования и для каждого типа почв характерны свои особенности ее пространственной организации и свойства, унаследованные от материнской породы в процессе почвообразования. При сельскохозяйственном использовании земель происходит трансформация структуры почв: изменяется пористость, плотность, что сказывается на ее функциональных физических и гидрофизических свойствах. Изменения в структурной организации черноземов при их интенсивном сельскохозяйственном использовании были отмечены многими исследователями (Щеглов, 1999; Безуглова, 2001, Курганова и др., 2021).

Все исследователи отмечают огромную роль органического вещества в трансформации структуры почвы при вовлечении ее в сельскохозяйственный оборот. Антропогенная эволюция черноземов пашни сопровождается, как правило, снижением содержания гумуса, формированием плужной подошвы и значительным уплотнением верхнего слоя. Агрегаты утрачивают свойство прочности и в первую очередь по отношению к воде. Для изучения всех аспектов влияния органического вещества на механизмы формирования водопрочных агрегатов большой интерес представляют исследования проведенные в черноземах на контрастных участках землепользования: некосимая степь и черный пар. Сравнение массы углерода во фракциях двух вариантов чернозема: целина, чистый пар показало, что все фракции

теряют углерод при деградации почвы, но наибольшие потери среди химических фракций наблюдаются для гумина (61%), среди физических – для окклюзированной легкой фракции (66%). (Данченко и др., 2022). При распашке, вследствие дробления, образуются частицы <math><0.25\text{ мм}</math>, которые могут слипаться в неводоустойчивые макроагрегаты и глыбы >10 мм. При снятии нагрузки глыбы и крупные агрегаты, взаимодействуя со свежепоступившим органическим веществом, приобретают водоустойчивость, при этом со временем структурные отдельности >10 мм практически все переходят в более мелкие размерные категории (Холодов и др., 2019). Было установлено, что положительная связь между содержанием микроагрегатов и углерода начинает проявляться только при содержании последнего больше 2–3% (Филиппова и др., 2019).

Система землепользования и агротехнические приемы оказывают значительное влияние на агрегатный состав и многие физические свойства почв. Но черноземы глинисто-иллювиальные лесостепной зоны Западной Сибири в условиях длительного использования под посевы сельскохозяйственных культур проявляют высокую степень устойчивости и сохраняют природную комковато-зернистую структуру. (Курганова и др., 2021).

Цель нашей работы – исследование морфологических изменений структуры чернозема типичного мощного разного землепользования.

Объекты и методы

Исследование проведено в Курской области на территории Центрально-Черноземного биосферного заповедника им. В.В. Алехина в Стрелецкой степи. и на опытных полях Курского Федерального Аграрного Научного Центра. Почва – чернозем типичный мощный (по WRB- *Naptic Chernozems*). тяжелосуглинистый, сформированный на лессовидных суглинках разного землепользования: целина – участок некосимая степь (Ч-НС), бессменный пар (Ч-БП), распаханый с 1947г., пашня- с зернопаропропашным севооборотом и прилегающая к ней лесополоса (опытные поля Курского НИИАП) Растительность лесополосы : дуб черешчатый, (*Quercus robur*), ясень высокий (*Fraxinus excelsio*), клен полевой (*Acer campestre*). Травянистый ярус отсутствует.

Сухое и мокрое просеивание проводили в 3-х повторностях через сита 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0,5, 0,25 мм на виброгрохоте AS 200 control (Retsch, Германия). Содержание общего углерода (С общ.) и карбонатов - методом сухого сжигания в токе кислорода при 950° определяли на экспресс анализаторе АН 7529 М (г. Гомель, Белоруссия) (Шейн Е.В. и др. 2019).

Микроморфологическое изучение шлифов проводили по методике (Добровольский, Шоба, 1978) с помощью поляризационного микроскопа модели Soptor CX40P факультета почвоведения МГУ, приобретенного по «Программе развития Московского университета». Фото сделаны при помощи цифровой

микроскопной видеокамеры SIMAGIS TC-5CU, которой укомплектован микроскоп Soptop CX40P. Субмикроморфологические исследования проведены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL jsm 6060 на факультете почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. (Методическое руководство по микроморфологии ... , 1979).

Результаты и обсуждение

По гранулометрическому составу исследованные нами черноземы типичные мощные относятся к суглинку тяжелому крупно-пылевато-иловатому. Длительная распашка чернозема (более 65 лет) привела к снижению содержания гумуса, формированию плужной подошвы и значительному уплотнению верхнего слоя (табл. 1). При сравнении почвенных разрезов выявлено наиболее значительное изменение верхних горизонтов (слои 0-30см) под воздействием сельскохозяйственной обработки, которое прослеживается как на мезоуровне, так и при микро- и субмикроморфологических исследованиях (рис.1-3).

При исследовании верхних горизонтов черноземов на мезоуровне отмечено, что в целинном черноземе типичном некосимой степи (Рис.1 а, b,c) наблюдается значительное содержание агрегированного материала, много корней по порам и структурным отдельностям, содержание губчатого материала в меж-поровом пространстве связано, по-видимому, с капрогенными агрегатами деятельности мезофауны.

Таблица 1. Физические и химические свойства чернозема типичного мощного

Тип землепользования	Горизонт, Глубина в см	W, % полевая	Плотность, г/см ²	С орг. %	С карб. %
Некосимая степь	AU 0-15	24.3	1.91	4.25	0
Чистый пар	PU 0-30	19.3	2.84	2.63	0
лесополоса	AU 0-15	17.8	1.13	4.84	0
пашня	PU 0-30	9.9	1.31	2.86	0

Структурные отдельности из пахотного горизонта PU чернозема (Рис.1. d, e, f) претерпевают видимые изменения порового пространства, снижается число порядков, появляются угловатые неправильные формы.

В верхнем гумусовом горизонте AU из лесополосы (Рис.1. j, g, i) представлены агрегаты трех порядков. Много округлых со сглаженной поверхностью, особенно самых мелких, вероятно капрогенных. Меж-агрегатное пространство заполнено

глинистым веществом, в поровом пространстве много корней и хорошо разложенных растительных остатков.

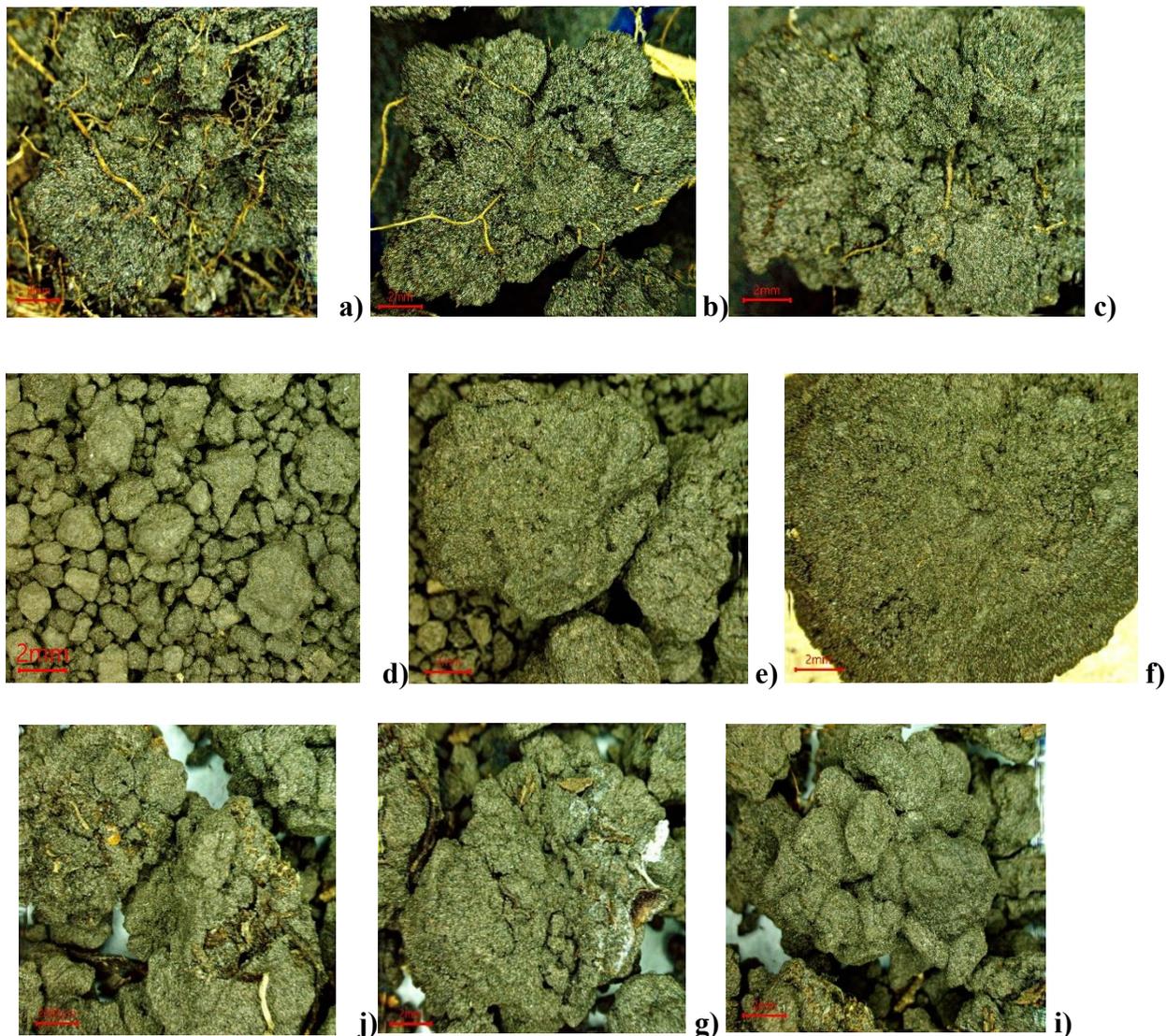


Рис. 1. Фото агрегатов чернозема типичного верхних горизонтов: AU HC- a-c); PU пашни -d-f); AU из лесополосы- j-i) (масштабный отрезок 2мм).

Верхние горизонты Ч-НС (AU) темно-серого цвета имеют гумусовую плазму, Ч-БП (PU) - глинисто-гумусовую (Рис. 2. a,b). В целинных черноземах наблюдаются многочисленные растительные остатки разной степени разложенности, обилие черных гумусовых сгустков. Высокая многопорядковая агрегированность, разветвленная сеть пор и пустот, значительное содержание тонкодисперсного

органического вещества (Рис. 2. а), много корней по порам и структурным отдельностям, содержание губчатого материала в меж-поровом пространстве связано, по-видимому, с капрогенными агрегатами деятельности мезофауны (Рис 2. а).

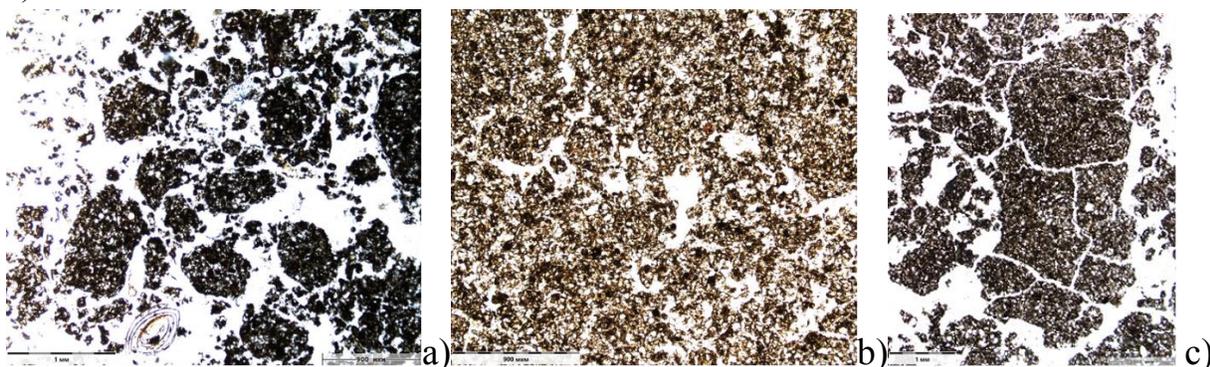


Рис. 2. Фото шлифов слоя 0-10 см в проходящем свете без анализатора: а) Ч-НС x 40 б) Ч-БП x 50 с) чернозем пахотный x 40

В пахотном горизонте (PU) из-за отсутствия ежегодного поступления растительных остатков (запахиваются только сорняки, которые на бессменном пару немногочисленны) резко снизилось содержание С органического вещества (с 4,55% на участке некосимая степь до 2,63% на участке бессменный пар). Поэтому, в пахотном горизонте чернозема преобладают процессы минерализации органического вещества, и плазма в этом случае глинисто-гумусовая, однородная с преобладанием тонкодисперсного изотропного гумуса, растительные остатки встречаются единично (рис.2. б).

Пахотный слой агрочернозема более плотный, что отражается и на структуре. Если на участке некосимой степи при описании разрезов отмечена зернистая структура (рис.2. а), то на смену ей на участке бессменный пар мы наблюдаем комковато-порошистую структуру верхнего горизонта (рис. 2б).

В PU отмечается уменьшение многопорядковости агрегатов (агрегаты состоят из агрегатов первого и второго порядков), снижение количества округлых отдельностей биогенного происхождения (копролитов разного возраста), появление у агрегатов острых граней. В пахотном горизонте по сравнению с целиной значительно возрастает содержание глыбистых агрегатов (рис.2 б, с). Возрастание доли фракции <0,25 мм в верхнем горизонте Ч-БП характеризуется появлением порошистой структуры на мезоуровне и наличии не агрегированной массы при рассмотрении шлифов (Рис. 2. б).

Отмечено изменение структуры порового пространства PU: вследствие разрушения агрегатов, снижается их порядковость, появляются угловатые формы, уменьшается количество крупных пор аэрации, биогенных ходов и пор-камер

происходит появление множества мелких, извилистых, разветвленных межагрегатных пор, что приводит к ухудшению фильтрационных свойств почв. (Рис 1. d, e, f).

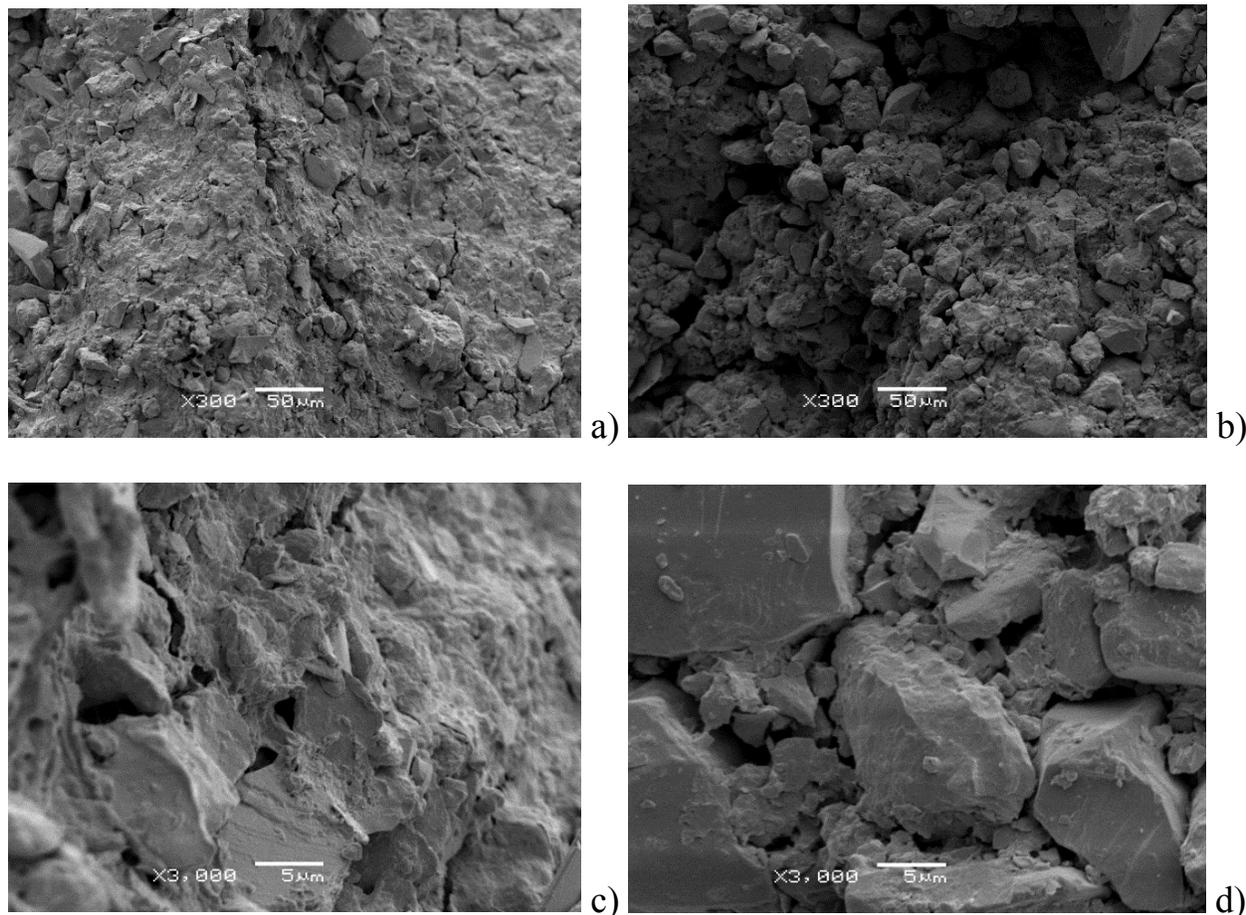


Рис. 3. СЕМ фото поверхности агрегатов: а, с - Ч-НС; b, d – Ч-БП (масштабный отрезок 50 и 5 мкм соответственно). Рыхлое микростроение, округлые, овальные агрегаты и микроагрегаты изотропная гумусовая плазма; Ку-НС-А1-17-30x20П

Провальная фильтрационная способность верхних горизонтов целинных черноземов снижается на пашне до 1,3-0,3 мм/мин.

При длительном нахождении чернозема под пашней в агрегатном составе повышено содержание фракции > 10мм и < 1мм. Агротомически-ценные воздушно-сухие агрегаты размерами 10-0,25 мм утрачивают свойство устойчивости в воде.

Таблица 2. Свойства структуры чернозема типичного мощного

тип землепользования	Горизонт, Глубина, см	Сумма агрегатов размера (10-0,25 мм), %	Агрегаты >10мм, %	Оценка структуры
Некосимая степь	AU 1-15	91.8	1.5	отличное
Черный пар	PU 0-32	58.5	17	хорошая
Лесополоса	AU 1-15	96.8	1.6	отличное
пашня	PU 0-32	60.7	8.8	хорошая

В составе агрегатов чернозема под лесополосой преобладают агрономически ценные фракции агрегатов 1-2, 2-3, 3-5, 5-7 мм (рис.4). Лесополосы широко распространены на Европейской части России. Их в основном сажали на старопахотных почвах разного генезиса и ландшафтов во второй половине прошлого века. В настоящее время, по сравнению с почвами прилегающей пашни, в почве под лесополосой идут процессы накопления органического вещества и восстановления (утраченной ранее) агрегатной структуры (таблица 2. ,рис. 1, 4). Гумусовые горизонты AU из лесополосы (Рис 1. j,g,i) состоят из трех порядков агрегатов, самые мелкие, округлые, гладкие. Меж-агрегатное пространство заполнено глинистым веществом, в поровом пространстве много корней и хорошо разложенных растительных остатков.

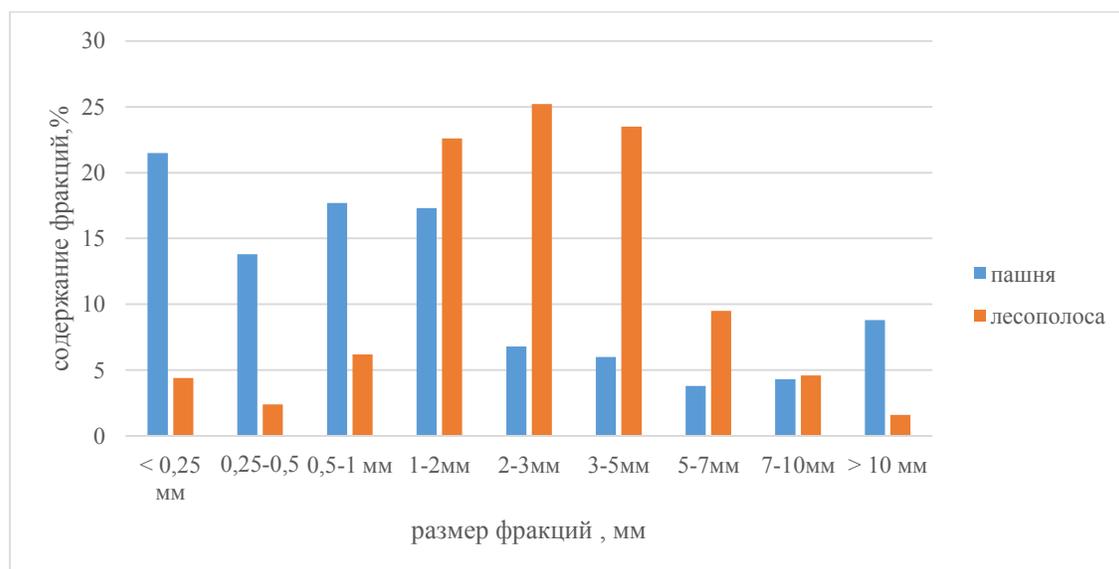


Рис. 4. Агрегатный состав чернозема типичного мощного (Курский НИИАП)

Формирование под лесополосой водоустойчивых микро- и макроагрегатов может происходить в результате нескольких процессов. На минеральных частицах

ила и мелкой пыли сорбируются, мигрирующие из горизонта подстилки водорастворимые органические вещества, а также экссудаты высших растений и микробные метаболиты. В результате сорбции органических веществ происходит гидрофобизация поверхности минеральных частиц. Весной и осенью, когда почва насыщена влагой, гидрофобным частицам энергетически выгодно минимизировать свой контакт с водой, и они объединяются друг с другом. Необходимое условие для гидрофобных взаимодействий между частицами – отсутствие внешнего физического воздействия. Регулярное чередование процессов иссушения – увлажнения, замораживания – оттаивания и набухания – сжатия способствуют увеличению адгезии между частицами такого микро- и макроагрегата. (Milanovskiy E.Yu, Tyugai Z., Shnyrev N.,2021).

Образование очень устойчивых микроагрегатов после сорбции метаболитов *Bacillus circulans* на монтмориллоните показано в работе (Shein E.V., Verkhovtseva N.V., Milanovsky at al.,2016). Дефицит органического вещества, регулярное перемешивание и разрушение агрегатной структуры в черноземе пашни, препятствуют формированию аналогичных микроагрегатов.

Выводы

1. Длительная распашка чернозема типичного мощного привела к резкому изменению структурно-функциональных свойств верхнего горизонта чернозема типичного мощного:

- Отмечено увеличение плотности сложения почвы при разрушении агрегатов, уменьшении их многопорядковости и доли губчатого материала, возрастании глыбистости, упрощении структуры порового пространства, уменьшении количества крупных пор биогенного происхождения;

- Произошло резкое снижение содержания органического вещества, что привело к исчезновению сгустков гумусовой плазмы, снижению количества растительных остатков разной степени разложённости;

- Снизилось содержание водостойчивых агрегатов при уменьшении количества отдельностей биогенного происхождения и толщины пленок органического вещества (различимых СЭМ), покрывающих агрегаты и минеральные зерна.

2. В настоящее время, по сравнению с почвами прилегающей пашни, в почве под лесополосой идут процессы накопления органического вещества и восстановления (утраченной ранее) агрегатной структуры.

Благодарность

Исследование проведено по темам НИР: Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления (№ 121040800146-3), Почвенные биомаркеры: идентификация, устойчивость, активность, возможность

использования для мониторинга (№ 122011800459-3), Почвенные информационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов (121040800147-0).

Литература

- Безуглова О.С. (2001) Гумусное состояние почв юга России. Ростов-на-Дону, Изд-во СКНЦВШ. 228с.
- Данченко Н.Н., З. С. Артемьева, Ю. Г. Колягин, Б. М. Когут (2022) Сравнительный анализ гумусовых веществ и органического вещества физических фракций чернозема типичного. *Почвоведение* **10**, 1241-1254. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22100033>
- Добровольский Г.В., Шоба С.А. (1978) Растровая электронная микроскопия почв. М., Изд-во Моск.ун-та, 144 с.
- Курганова И.Н., В.О. Лопес де Гереню, Е.Н. Смоленцева, М.П. Семенова, В.И. Личко, Б.А. Смоленцев (2021) Влияние типа землепользования на физические свойства черноземов лесостепной зоны Западной Сибири. *Почвоведение* **9**, 1061-1075. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21090045>
- Методическое руководство по микроморфологии почв под редакцией Г.В. Добровольского. (1983) М. Изд-во Моск. ун-та.
- Холодов В. А., Ярославцева Н. В., Фарходов Ю. Р., Белобров В. П., Юдин С. А., Айдиев А. Я., Лазарев В. И., Фрид А. С. (2019) Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях землепользования. *Почвоведение* **2**, 184-193. doi: 10.1134/S0032180X19020060
- Филиппова О. И., Холодов В. А., Сафронова Н. А., Юдина А. В., Куликова Н. А. (2019) Микроагрегатный, гранулометрический и агрегатный состав гумусовых горизонтов ряда почв европейской России. *Почвоведение* **3**, 335-347. doi: 10.1134/S0032180X19030031
- Щеглов Д.И. (1999) Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов. -М.: Наука, 214с.
- Шейн Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д. Поздняков А.И., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н., Дембовецкий А.В.(2019) Практикум по физике твердой фазы почв. Учебное пособие. - М., «Буки-Веди», 119 с.
- Shein E.V., Verkhovtseva N.V., Milanovsky E.Y., Romanycheva A.A. (2016) Microbiological modification of kaolinite and montmorillonite surface. *Biogeosystem Technique*, **9(3)**, 229-234.
- Milanovskiy E.Yu, Tyugai Z., Shnyrev N. (2021) Organic carbon and particle size distribution of aggregates from chernozem under arable land and shelterbelt. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **895**, 1-7.

УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ НА НЕКОТОРЫЕ ИХ СВОЙСТВА

Федотов Г.Н.¹, Тарасенко Д.А.¹, Горепекин И.В.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
gennadiy.fedotov@gmail.com

THE INFLUENCE OF FRACTAL-CLUSTER ORGANIZATION OF SOIL ORGANIC
MATTER ON SOME OF THEIR PROPERTIES

Fedotov G.N., Tarasenko D.A., Gorepekin I.V.
Faculty of Soil Science of Moscow State University

Annotation: F-clusters with a size of 100-200 nm form many humic substances (HS): humic acids, humates, fulvic acids etc. The X-ray local microanalysis confirmed the organic nature of the F-clusters. The size of F-clusters is influenced by pH and soil type. F-clusters determine the water stability of soil aggregates.

Введение

За последние несколько десятилетий в связи с использованием новых методов и подходов (Piccolo, 2001; Федотов, Добровольский, 2012) значительно изменились представления о гуминовых веществах (ГВ) (Zavarzina et al., 2021). Сначала произошел переход от традиционных макромолекулярных (Орлов, 1990; Stevenson, 1994) к супрамолекулярным представлениям (Kerner et al., 2003; Piccolo, 2001; Schaumann, 2006; Šmejkalov, Piccolo, 2008), а затем к модели непрерывного континуума (Langford, Melton, 2005; Lehmann, Kleber, 2015), не отрицающей супрамолекулярности.

При изучении растворов гуминовых кислот (ГК) методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) установлено, что ГК имеют фрактальную организацию (Österberg, Mortensen, 1992; Senesi et al., 1996; Senesi et al., 1997) и представляют собой фрактальные кластеры размером 100-200 нм (Ф-кластеры) (рис. 1. а), образованные частицами-молекулами ГК размером около 10 нм. Следует отметить, что исследование образцов, почв различной зональности, проведенное методом МУРН (Федотов и др., 2005), показало, что для них всех характерно существование фрактальных структур в том же размерном диапазоне. Причем информация по строению ГК в растворах коррелировала с информацией по строению ГВ в почвах (интервал существования фракталов и фрактальной размерности). Это делало логичным предположение о сходстве строения надмолекулярных образований из частиц ГВ в почвах со строением подобных образований ГК.

Учитывая, что в почвах частицы покрыты и связаны между собой пленками-гелями из коллоидных частиц (Тюлин, 1958), основой которых является органическое вещество почв (Федотов, Добровольский, 2012), следовал логичный вывод о том, что Ф-кластеры входят в состав пленок-гелей. При помощи туннельной микроскопии путем изучения выделившихся из образцов воздушно-сухих почв обломков пленок-гелей это было подтверждено экспериментально (Федотов, Добровольский, 2012).

Таким образом, наноструктурную организацию почв можно представить следующим образом:

- 1 ступень – частицы-молекулы ГВ (Österberg, Mortensen, 1992; Senesi et al., 1996).
- 2 ступень – Ф-кластеры, состоящие из частиц-молекул ГВ (рис 1. а) (Österberg, Mortensen, 1992; Senesi et al., 1996).
- 3 ступень – почвенные гели, основой которых являются Ф-кластеры, покрывающие и связывающие минеральные частицы между собой, образуя почву (Тюлин, 1958).

Остановимся на вопросе существования в пленках-гелях ГВ в виде первичных частиц или Ф-кластеров. Данный вопрос является принципиальным, так как высокая вероятность существования частиц-молекул ГВ в свободном состоянии свидетельствовало бы о корректности применяемых ранее предложенных подходов к изучению ГВ почв. Это свойство для растворов ГК было достаточно хорошо изучено.

Значения критических концентраций агрегирования определяли, чаще всего, методами оптических исследований (Fasurova, 2006; Евдокимов, Лосев, 2008). Отмечено, что изменения, связанные с самоассоциацией молекул ГК, были заметны уже при концентрациях 1 мг/л, а завершение данной стадии агрегирования происходило при концентрациях, не превышающих 15-20 мг/л. Агрегирование в растворах гуминовых кислот при концентрациях 10-30 мг/л наблюдали и другие исследователи (Reid et al., 1991; Palmer, von Wandruszka, 2001), считая, что формирование кластеров из ГК происходит посредством нековалентных взаимодействий (Reid et al., 1991; Langford, Melton, 2005; Sutton, Sposito, 2005). По-видимому, образование Ф-кластеров связано с тем, что частицы-молекулы ГВ имеют мозаичную дифильную поверхность (Милановский, 2009) и, взаимодействуя между собой через гидрофобные участки поверхности, образуют Ф-кластеры. Именно дальное действие гидрофобных взаимодействий (Виноградова, 2000) обеспечивает столь высокое сродство между частицами ГВ.

В почвенных растворах концентрация ГВ на много порядков выше критических концентраций (10-30 мг/л) образования из первичных частиц ГВ Ф-кластеров. Из этого следует, что ГВ должны существовать в гелях почв и в почвенных растворах практически исключительно в виде Ф-кластеров, которые в почвах исследовали весьма незначительно.

Как было отмечено выше, размеры Ф-кластеров составляют 100-200 нм (0,1-0,2 мкм), то есть они достаточно велики, чтобы их можно было изучать, используя обычный растровый электронный микроскоп (РЭМ), и не обнаружить их исследователи не могли. Так Д.С. Орлов при изучении растворов гуминовых кислот при помощи РЭМ отмечал наличие сферических образований размером 100 нм и более и относил их к надмолекулярным структурам ГВ (Орлов, 1992), которые он не стал исследовать из-за того, что его целью было изучение молекул ГВ.

Нам исследование этих надмолекулярных структур представлялось чрезвычайно важным, так как из приведенного выше анализа литературных данных следовал однозначный вывод о том, что Ф-кластеры представляют собой главную форму существования ГВ в почвах, являются основой почвенных гелей и должны обуславливать многие свойства почв.

Целью работы было изучение Ф-кластеров, а также оценка возможного влияния этих надмолекулярных образований на свойства почв.

Объекты и методы

Объекты исследования

В качестве объектов исследования использовали:

- ГК, выделенную из подзолистой почвы (Тверская область);
- фульвокислоты (ФК), выделенные из дерново-подзолистой почвы (Московская область) и бурого угля;
- Гумат калия (натрия) из бурого угля (фирмы ООО НВЦ «Агротехнологии»)
- Гумат калия из торфа (фирмы Humic Land).

Также использовали образцы верхового и низинного торфов и образцы почв, отобранные из гумусовых горизонтов:

- Дерново-подзолистой почвы (Московская область);
- Темно серой лесной почвы (Владимирская область);
- Чернозема типичного (Саратовская область);
- Чернозема выщелоченного (Орловская область);
- Краснозема (Чаква);
- Бурозема (Краснодарский край);
- Горно-луговой почвы (Крым).

Методы исследования

Электронно-микроскопическое исследование и рентгено-локальный микроанализ проводили при помощи энергодисперсионного спектрометра на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL-6060A (фирмы JEOL, Япония) с вольфрамовым катодом.

К сложностям исследования Ф-кластеров относятся их малая плотность и ажурность структуры (высокая пористость) (Österberg, Mortensen, 1992). Поэтому для

изучения Ф-кластеров их необходимо помещать на атомно-гладкую поверхность так, чтобы они находились на расстоянии друг от друга – не накладывались друг на друга и взаимно не проникали друг в друга, что можно наблюдать из схемы взаимодействия Ф-кластеров (рис. 1, б). При этом проводить исследование Ф-кластеров из-за их органической природы и малой плотности (высокой пористости) следует при малых ускоряющих напряжениях 2-5 кВ.

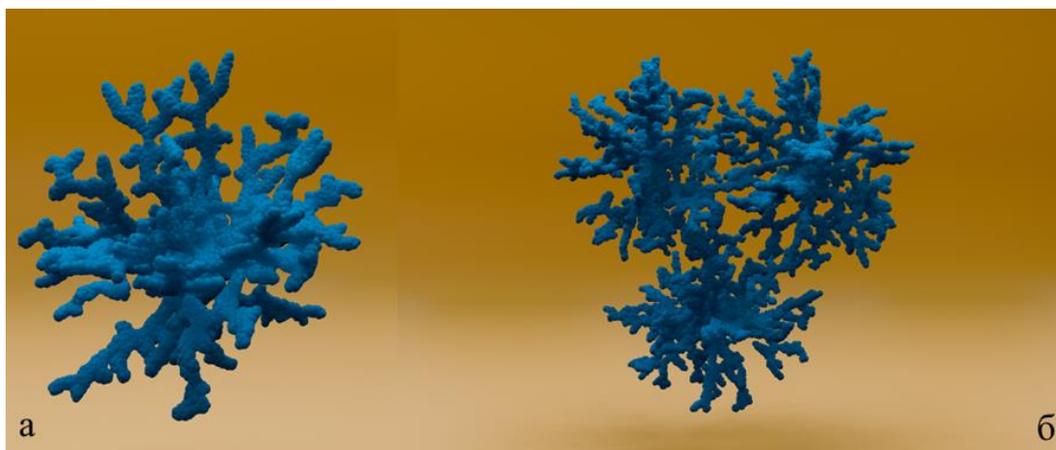


Рис. 1. Схема Ф-кластера (а) и группа из 3 взаимопроникающих Ф-кластеров (б)

При подготовке образцов несколько грамм почвы добавляли к 100 г воды и в течение нескольких часов перемешивали. Затем полученную суспензию центрифугировали 10 минут при 4000 об/мин. 1 мл полученной при использовании почв жидкости или 1 мл раствора ГК или гуматов (концентрацией 10 г/л) разбавляли водой в 100, 1000, 10000 и 100000 раз. Из полученных образцов отбирали аликвоты объемом 5 мкл и наносили на столики для РЭМ, на которых на углеродном скотче были закреплены атомно-гладкие пластинки слюды размером 5×5 мм. Образцы высушивали на воздухе, а перед исследованием напыляли золото, используя установку JFC-1600 (фирмы JEOL, Япония).

Для выяснения химического состава Ф-кластеров раствор, содержащий Ф-кластеры, наносили на поверхность золотой фольги, подсушивали каплю на воздухе, затем вновь наносили каплю раствора. Этот процесс продолжали до образования хорошо различимого слоя на поверхности пластинки. После этого проводили рентгено-локальный микроанализ.

Для проверки влияния Ф-кластеров на водоустойчивость из агрегатов удаляли воздух вакуумированием, после чего капиллярно насыщали водой до значений близких к насыщению. После этого определяли влияние длительности капиллярного увлажнения на водоустойчивость агрегатов по методу лезвий (Ушкова и др. 2023). Затем воду, которая могла содержать Ф-кластеры, разбавили, нанесли на

поверхность слюды, высушили и изучили полученные образцы при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ).

Водоустойчивость определяли в шестикратной повторности с последующей статистической обработкой результатов с использованием программного обеспечения OriginPro, в котором рассчитывали доверительный интервал, который не превышал 10% при 95% уровне значимости.

Результаты и обсуждение

Для проверки возможности при помощи РЭМ обнаруживать и изучать Ф-кластеры были исследованы образцы, приготовленные из растворов ГК и ФК (рис. 2, а).

На полученной микрофотографии (рис. 2, а) хорошо видны Ф-кластеры разного размера от 100 нм и выше. Причем из микрофотографии можно сделать вывод, что Ф-кластеры большего размера, по-видимому, образуются при объединении мелких Ф-кластеров.

На следующем этапе исследования были изучены Ф-кластеры в растворах гуматов (рис. 2, б). Хорошо видно, что Ф-кластеры гуматов из торфа в несколько раз крупнее Ф-кластеров гуматов из бурого угля (рис. 2, б). Обращает на себя внимание, что изменение рН растворов гуматов приводит к изменению размеров Ф-кластеров в них (рис. 2, в).

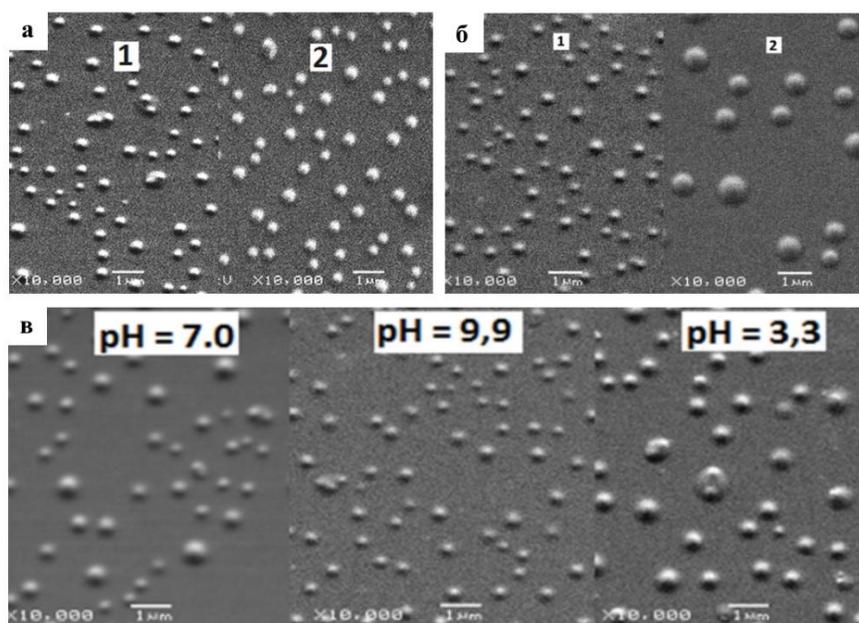


Рис. 2. Ф-кластеры гуминовой кислоты из подзолистой почвы (а-1) и фульвокислот из дерново-подзолистой почвы (а-2), а также гуматов из бурого угля (б-1) и торфа (б-2) при нейтральных рН (б) и Ф-кластеры гуматов из бурого угля при различных рН (в).

Наиболее мелкие Ф-кластеры существуют в растворах гуматов с высокими рН, а наиболее крупные Ф-кластеры в растворах с низкими рН. Можно предположить, что высокие рН приводят к реорганизации Ф-кластеров уменьшая количество частиц-молекул, участвующих в их образовании.

Ф-кластеры выделяются также из торфов и почв (рис. 3). При изучении Ф-кластеров, выделяющихся из почв (рис. 3, б) хорошо видно, что в зависимости от типа почв их размеры меняются. Самые мелкие Ф-кластеры характерны для краснозема и бурозема, а самые крупные – для горно-луговой почвы. Учитывая, что из почв и торфов может выделяться в воду только легкорастворимое органическое вещество, полученные данные свидетельствуют о том, что оно также как ГК и ФК существует в виде Ф-кластеров. Это не вызывает удивления, так как природа частиц молекул ГК и ФК схожа (Милановский, 2009), они представляют собой частицы-молекулы с мозаичной дифильной поверхностью, что, по-видимому, и обеспечивает их самоорганизацию в Ф-кластеры.

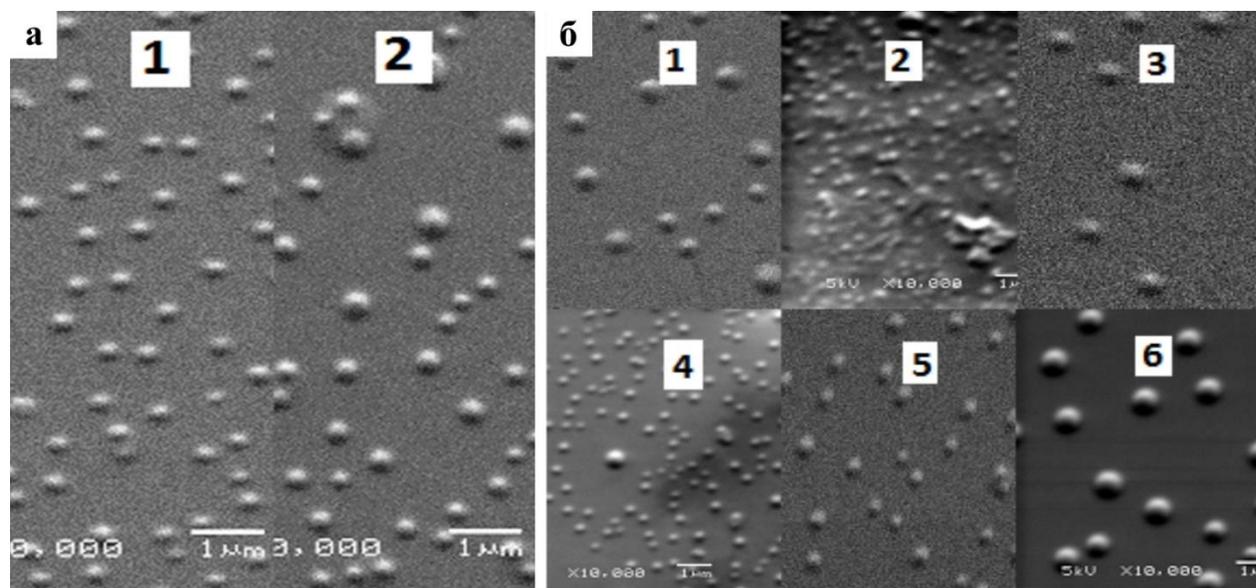


Рис. 3. Ф-кластеры, выделяющиеся (а) из верхового (а-1) и низинного (а-2) торфов и (б) из различных почв: б-1 – чернозем, б-2 – краснозем, б-3 – серая лесная почва, б-4 – бурозем, б-5 – дерново- подзолистая почва, б-6 – горно-луговая почва.

Для устранения сомнений, что из почв в воду переходят именно Ф-кластеры, состоящие из органического вещества почв, был проведен рентгеновский микроанализ и определен элементный состав Ф-кластеров, выделенных в воду из дерново-подзолистой почвы. Результаты свидетельствовали, что примерно на 97% Ф-кластеры образованы ГВ, на 2% оксидом кремния, на 1% оксидом алюминия.

Из представленного во введении обзора литературы хорошо видно, что вся информация для выдвижения предположения о фрактально-кластерной организации органического вещества почв была известна уже 15-20 лет назад, а запаздывание с выдвижением и проверкой этой гипотезы, по-видимому, связано с отсутствием работ по изучению влияния фрактально-кластерной организации ГВ на свойства почв. Без этого фрактально-кластерная концепция не представляет большого интереса для почвоведов. В связи с этим вторую часть статьи мы решили посвятить именно рассмотрению влияния фрактально-кластерной организации органического вещества почв на их свойства.

Для этого мы остановились на таком свойстве как водоустойчивость почв. Общепринято, что агрегатный состав и водоустойчивость агрегатов связаны с органическим веществом почв, его количеством и качеством, но до сих пор не имеется удовлетворительной гипотезы, объясняющей механизмы этой взаимосвязи. При этом попыток использования представлений о надмолекулярной структуре ГВ для объяснения водоустойчивости почвенных агрегатов нами в литературе обнаружено не было.

Мы решили проверить наличие влияния взаимодействия агрегатов с водой на их водоустойчивость. Для этого использовали метод «лезвий», меняя время контакта агрегатов с водой перед определением водоустойчивости. Результаты представлены на графике (рис. 4).

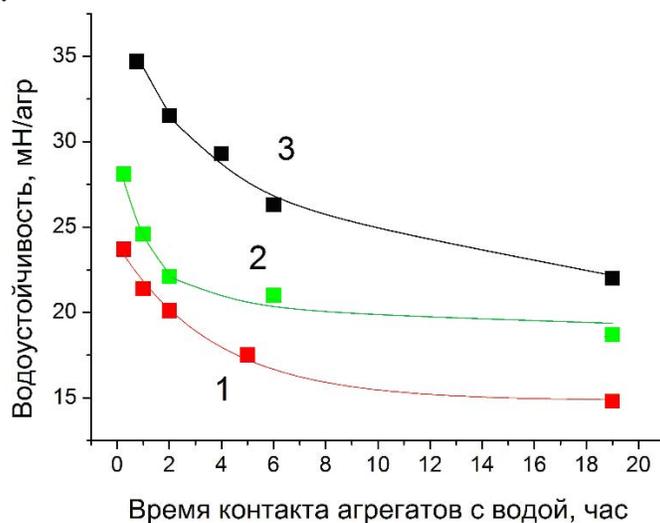


Рис. 4. Влияние времени контакта агрегатов с водой на водоустойчивость почвенных агрегатов Цифрами обозначены: 1 – дерново-подзолистая почва; 2 – темно-серая лесная почва; 3 – чернозем выщелоченный.

Из полученных данных хорошо видно, что при увеличении времени контакта агрегатов всех изученных почв с водой их водоустойчивость экспоненциально

снижается. Следовательно, вода без механического воздействия снижает водоустойчивость почвенной структуры.

Объяснять подобное снижение водоустойчивости принято влиянием расклинивающего давления. Считается, что механизм разрушения внутриагрегатных связей обусловлен расклинивающими свойствами водной пленки, заключенной между частицами почвы. Согласно физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах, устойчивость и неустойчивость дисперсных систем, к которым относятся и почвы, определяется соотношением сил притяжения и отталкивания между частицами (Осипов, 2013). Силы притяжения обусловлены межмолекулярным взаимодействием (силами Ван-дер-Ваальса), сорбцией, гидрофобными взаимодействиями. Источником сил отталкивания является электростатическое взаимодействие диффузных частей двойных электрических слоев соседних частиц. Увеличение концентрации ионов в зазоре между частицами при перекрытии ионных атмосфер создает локальное осмотическое давление, под влиянием которого жидкая фаза стремится войти в прослойку между ними и раздвинуть их. Так возникает электростатическая компонента расклинивающего давления.

Для проверки на черноземе, серой лесной и дерново-подзолистой почвах было проведено определение водоустойчивости в 0,1 н и 1 н растворах хлорида калия.

Данные теоретические обоснования потери водоустойчивости почвенных агрегатов при их контакте с водой, перенесенные с грунтов на почвы, нуждались в экспериментальной проверке. При существовании значимого влияния расклинивающего давления водоустойчивость образцов при таком определении должна была превышать водоустойчивость, измеренную в воде. Однако различий водоустойчивостей мы не обнаружили (табл. 1). Это свидетельствовало о том, что, несмотря на привычность представлений о значимом влиянии расклинивающего давления на водоустойчивость, это не соответствует действительности.

Таблица 1. Водоустойчивость почвенных агрегатов методом лезвий в воде, 0,1 н и 1 н водных растворах хлорида калия, мН/агр

Почва	Вода	0,1 н раствор хлорида калия	1 н раствор хлорида калия
Дерново-подзолистая почва	23,75±0,86	23,71±1,32	23,87±1,55
Серая лесная почва	28,12±2,49	27,67±0,93	27,31±0,77
Чернозем типичный	34,73±0,88	34,32±1,37	34,10±1,33

Для того чтобы объяснить механизм снижения водоустойчивости при капиллярном контакте агрегатов, мы решили использовать представления о надмолекулярной организации ГВ.

Для проверки этого предположения почвенные агрегаты привели в контакт с водой через хлопчатобумажную ткань и выдерживали в течение 19 часов. Затем воду, которая могла содержать Ф-кластеры, разбавили, нанесли на поверхность слюды, высушили и изучили полученные образцы при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ).

На микрофотографии, представленной в качестве примера (Рис. 5, а) хорошо видны Ф-кластеры, выделившиеся из чернозема. Аналогичные микрофотографии получены для Ф-кластеров, выделившихся из дерново-подзолистой и серой лесной почв.

Из полученных данных следует, что Ф-кластеры, составляющие почвенные гели, способны переходить по пленочной воде по ткани в контактирующую с ними воду, а водоустойчивость почвенных агрегатов в определенной степени обусловлена Ф-кластерами, являющимися основой почвенных гелей. Сопоставляя полученную информацию со сведениями из литературных источников по лабильному (растворимому в воде) гумусу (Шинкарев, Перепелкина, 1997; Когут, 2003) можно уверенно предполагать, что лабильный гумус, обеспечивающий водоустойчивость почв, представляет собой Ф-кластеры.

Из полученных данных следует довольно высокая подвижность Ф-кластеров из легкорастворимого органического вещества почв, которая была подтверждена при изучении их перехода из влажной почвы на чистые, контактирующие с ней поверхности. Для этого почвы влажностью близкой к наименьшей влагоемкости приводили в контакт через хлопчатобумажную ткань с атомно-гладкими поверхностями слюды. Уже через 10-15 минут на поверхность слюды переходило достаточное количество Ф-кластеров, которые были хорошо видны (Рис. 5, б).

Помимо водоустойчивости почв фрактально-кластерная концепция хорошо подходит для объяснения некоторых свойств относящихся к химии почв. В монографии Д.С. Орлова (Орлов, 1990) приведены данные о более высокой оптической плотности щелочных растворов фульвокислот по сравнению с кислыми растворами в интервале длин волн 410-460 нм. Разница составляет 25-30%. Было отмечено, что изменение окраски обратимо. Объяснялось наблюдаемое явление «существованием по крайней мере двух форм фульвокислот». Особенности этих форм и механизмы взаимных переходов были не ясны. Мы повторили эксперименты Д.С. Орлова, используя ФК, выделенную из бурого угля. Результаты по разным оптическим плотностям кислых и щелочных растворов ФК подтвердились. После этого мы проверили размер частиц ФК в этих растворах при помощи РЭМ (Рис. 5, в). На микрофотографиях хорошо видно, что размер Ф-кластеров ФК в щелочных растворах заметно меньше размера Ф-кластеров в кислых растворах. Предположение Д.С. Орлова о существовании 2-х форм ФК в целом подтвердилось, только речь идет о двух формах Ф-кластеров ФК.

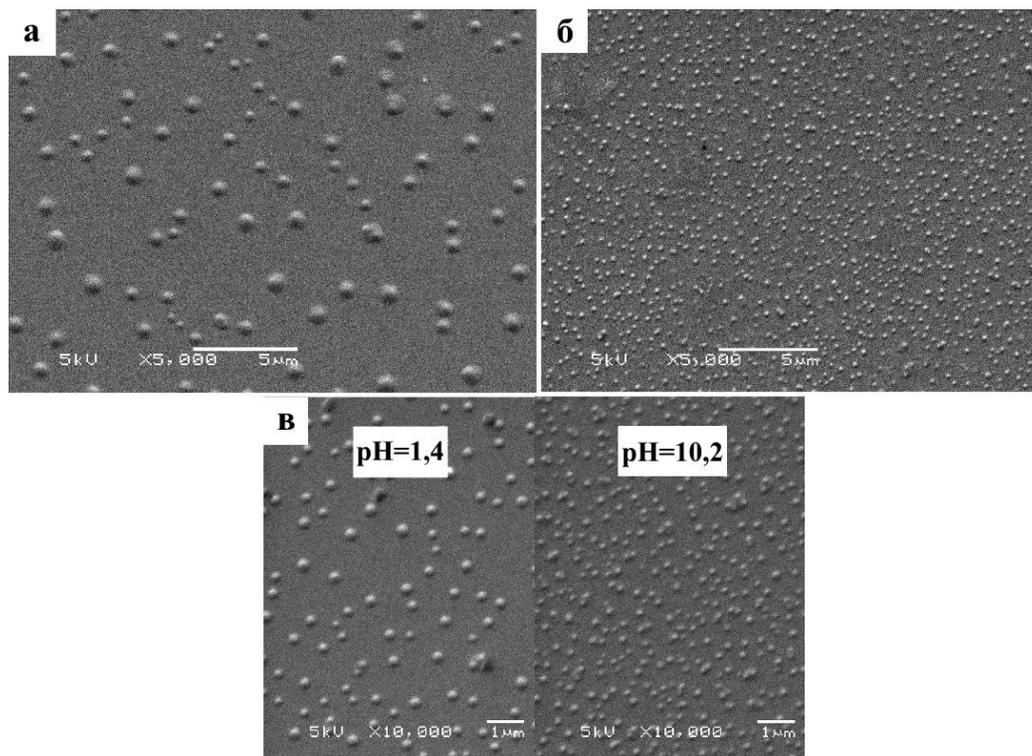


Рис. 5. Ф-кластеры: (а) перешедшие в воду при контакте агрегатов чернозема с водой через хлопчатобумажные фитили в течение 19 часов; (б) перешедшие из дерново-подзолистой почвы на стекло через слой хлопчатобумажной ткани; (в) ФК в кислом и щелочном растворах.

Таким образом, представленные данные подтверждают гипотезу о фрактально-кластерной организации ГВ почв и об определяющем влиянии этой формы существования ГВ на некоторые свойства почв. Можно предположить, что Ф-кластеры это возможное объяснение многих гидрофизических явлений: снижение фильтрации во времени при постоянном напоре на поверхности почвы; снижение дренажного стока в период длительного весеннего снеготаяния; уменьшение во времени водоотдачи, а также её сравнительное снижение после цикла увлажнения/иссушения.

Выводы

1. В виде Ф-кластеров существуют гуминовые кислоты, фульвокислоты (ФК), гуматы и водорастворимая составляющая ГВ почв, а Ф-кластеры, по-видимому, являются формой существования ГВ.

2. Высокая концентрация в почвах молекул-частиц ГВ и их высокое стремление к надмолекулярной самоорганизации обеспечивают их существование в почвах в виде Ф-кластеров.
3. Элементный микроанализ Ф-кластеров из дерново-подзолистой почвы показал, что они на 97% образованы ГВ, на 2% оксидом кремния, на 1% оксидом алюминия, т.е. их основой являются органические вещества.
4. Ф-кластеры обеспечивают водоустойчивость почв, так как снижение водоустойчивости агрегатов происходило при выходе из них Ф-кластеров.
5. Ф-кластерная концепция хорошо объясняет разную оптическую плотность кислых и щелочных растворов ФК.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке работы РНФ (проект № 22-14-00107).

Авторы выражают благодарность сотрудникам факультета почвоведения МГУ: ведущему научному сотруднику Демину В.В., старшему научному сотруднику Степанову А.А., заведующей лабораторией экологического почвоведения Ковалевой Н.О. за предоставление образцов для исследования.

Литература

Виноградова О.И. (2000) Особенности гидродинамического и равновесного взаимодействия гидрофобных поверхностей. Дисс. докт. физ.-мат. Наук. М. 175.

Евдокимов И.П., Лосев А.П. (2008) Природные нанообъекты в нефтегазовых средах М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 104 с.

Когут Б. М. (2003). Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах. *Почвоведение*, **3**, 308-316. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17289034>

Милановский Е.Ю. (2009) Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 186.

Орлов Д.С. (1990) Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд. МГУ, 325.

Орлов Д.С. (1992) Химия почв. М.: Изд. МГУ, 400.

Осипов В. И. (2013) Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. *Грунтоведение*, **2**, 3-35.

Супрамолекулярная химия: Концепции и перспективы. (1998) Ж.-М. Лен; Пер. с англ. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 334.

Тюлин А.Ф. (1958) Органно-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М.: АН СССР, 52.

Ушкова Д.А., Конкина У.А., Горепекин И.В., Потапов Д.И., Шеин Е.В., Федотов Г.Н. Устойчивость агрегатов пахотных почв: экспериментальное определение и нормативная характеристика. *Почвоведение*, **2**, 203-210. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50404085>

Федотов Г.Н., Добровольский Г.В. (2012) Возможные пути формирования нано- и микроструктур в гумусовых веществах почвенных гелей. *Почвоведение*, **8**, 908-920. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17794210>

Федотов Г.Н., Третьяков Ю.Д., Иванов В.К., Куклин А.И., Пахомов Е.И., Исламов А.Х., Початкова Т.Н. (2005) Фрактальные коллоидные структуры в почвах различной зональности. Доклады Академии Наук, **405** (3), 351-354. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9149685>

Шинкарев А.А., Перепелкина Е.Б. (1997) Содержание и состав гумусовых веществ в водопрочных агрегатах темно-серой лесной почвы. *Почвоведение*, **2**, 165-172.

Fasurova N., Cechlovska H., Kucerik J. (2006) A comparative study of South Moravian lignite and standard IHSS humic acids' optical and colloidal properties. *Petroleum and Coal*. **48(2)**, 24-32.

Kerner M., Hohenberg H., Ertl S., Reckermann M., Spitz A. (2003). Self-organization of dissolved organic matter to micelle-like microparticles in river water. *Nature*, **422(6928)**, 150-154. <https://www.nature.com/articles/nature01469>

Langford C. H., Melton J. R. (2005). When should humic substances be treated as dynamic combinatorial systems. *Humic substances*, 65-78.

Lehmann J., Kleber M. (2015) The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, **528(7580)**, 60-68. <https://www.nature.com/articles/nature16069>

Mandelbrot B.B. (2000) The fractal geometry of nature. N.Y.: W.H. Freeman&Co, 468.

Österberg R., Mortensen K. (1992) Fractal dimension of humic acids: A small angle neutron scattering study. *European biophysics journal*, **21**, 163-167. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00196759>

Palmer N. E., von Wandruszka R. (2001) Dynamic light scattering measurements of particle size development in aqueous humic materials. *Fresenius' journal of analytical chemistry*, **371**, 951-954. <https://link.springer.com/article/10.1007/s002160101037>

Piccolo A. (2001) The supramolecular structure of humic substances. *Soil science*, **166(11)**, 810-832. https://journals.lww.com/soilsci/abstract/2001/11000/the_supramolecular_structure_of_humic_substances.7.aspx

Reid P. M., Wilkinson A. E., Tipping E., Jones M. N. (1991) Aggregation of humic substances in aqueous media as determined by light-scattering methods. *Journal of soil science*, **42(2)**, 259-270. <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.1991.tb00407.x>

Schaumann G. E. (2006). Soil organic matter beyond molecular structure Part I: Macromolecular and supramolecular characteristics. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **169(2)**, 145-156.
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jpln.200521785?casa_token=QNdwow_NiTIAAAAA:gVNm03Bi3BRf3EVnO5IOPFur5bY4peRU4k8QZfAv0PX1WXxjKFht_rXR18W4-UnStrDzOwHV7R_IxOMV

Schmidt M. W., Torn M. S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I. A., ... & Trumbore S. E. (2011) Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, **478(7367)**, 49-56. <https://www.nature.com/articles/nature10386>

Senesi N., Rizzi F. R., Dellino P., Acquafredda P. (1997) Fractal humic acids in aqueous suspensions at various concentrations, ionic strengths, and pH values. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **127(1-3)**, 57-68.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775796039490>

Senesi N., Rizzi F. R., Dellino P., Acquafredda P. (1996) Fractal dimension of humic acids in aqueous suspension as a function of pH and time. *Soil Science Society of America Journal*, **60(6)**, 1773-1780.
https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1996.03615995006000060023x?casa_token=21_LdoeGBo0AAAAA:gpC0WkAF6QRblEDBdGZffZnLOBHB0vfwk30l0aczJujUwQkVvGeSW0ip61_xHAQm8F1YpMEnn44t6Z2Y

Šmejkalová D., Piccolo A. (2008) Aggregation and disaggregation of humic supramolecular assemblies by NMR diffusion ordered spectroscopy (DOSY-NMR). *Environmental science & technology*, **42(3)**, 699-706.

Stevenson F. J. (1994) Humus chemistry: genesis, composition, reactions. John Wiley & Sons, 443.
https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es071828p?casa_token=rUf6YxXHSG4AAAAA%3AWa_2LH-z-5MJRDgdF3iKau3V7728Tmq-zozSWRAg7CvcznWCdDoz9JnLw_mF9Bq0oyUJ3BvqfE9qs2f

Sutton R., Sposito G. (2005) Molecular structure in soil humic substances: the new view. *Environmental science & technology*, **39(23)**, 9009-9015.
https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es050778q?casa_token=PvL0dtaTjMMAAAAAA%3AZaEBu8WqipJw2kvPAgqWEW6kGbA5LQSDI_xtfQ59LGc0G-3woARgXnRF6d6qasotwzkH3GIyymZiX8Oq

Zavarzina A. G., Danchenko N. N., Demin V. V., Artemyeva Z. S., Kogut B. M. (2021) Humic substances: hypotheses and reality (a review). *Eurasian Soil Science*, **54**, 1826-1854.
<https://link.springer.com/article/10.1134/S1064229321120164>

УДК 631.81:632.93

РОЛЬ ИОНИТНЫХ СУБСТРАТОВ КАК ИСТОЧНИКА МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПРОВОКАЦИОННОГО ФОНА

Ферапонтова С.А.

Научный сотрудник лаборатории биологического контроля фитофагов и фитопатогенов
СФНЦА РАН, Новосибирская область, р.п. Краснообск, s.ferapontovaa@mail.ru

The role of ionite substrates as a source of mineral nutrition for plants in a provocative
background

Ferapontova S.A.

Researcher Laboratory of biological control of phytophages and phytopathogens
SFNCA RAS, Novosibirsk region, Krasnoobsk settlement, s.ferapontovaa@mail.ru

Annotation: Mineral nutrition management is one of the methods to maintain plant health in an integrated crop protection system. It is shown that the use of ionic substrate ZION Classic based on zeolite as a source of basic nutrition elements allows to optimize the growth and development of cucumber plants under artificial infectious background of *Fusarium oxysporum*.

Введение

В настоящее время ввиду интенсификации сельскохозяйственного производства огромное внимание уделяется средствам защиты растений. Список разрешённых к применению препаратов на территории Российской Федерации превышает 1600 наименований [1]. При этом редко принципы защиты растений рассматриваются в разрезе интегрированного подхода, где управление вредными объектами и здоровьем растений идёт через комплекс приёмов и мероприятий [2]. Ведущее место в интегрированной защите отводится агротехническому методу, в котором одним из приёмов, имеющих фитосанитарную направленность, является оптимизация минерального питания возделываемых культур [3]. Известно, что минеральные элементы питания могут оказывать как прямое (через активацию специфических ферментов), так и косвенное влияние (повышение микробиологической активности, изменение корневых выделений и pH среды) на устойчивость растений к заболеваниям [5].

В современном растениеводстве широкое распространение получают субстраты на основе природных цеолитов, используемых в качестве источника макро- и микроэлементного питания. Эти минералы обладают высокой ионообменной способностью и площадью поверхности, чем привлекают при разработке функциональных препаратов [6]. Так ряд зарубежных исследователей в своей работе показывают, что ионообменные цеолиты при соединении с отдельными

микроэлементами проявляют противогрибковую активность в отношении видов из р. *Fusarium* [4].

Целью наших исследований стало изучение влияния ионитного субстрата ZION Классик на основе природных цеолитов на рост и развитие культуры огурца в условиях искусственного инфекционного фона *Fusarium oxysporum*.

Объекты и методы

Исследование проводили на базе лаборатории биологического контроля фитофагов и фитопатогенов СФНЦА РАН на инфекционно-провокационном фоне. В качестве тест-культуры использовали огурец Пучкофф F1. Для создания инфекционного фона проводили наработку гриба *Fusarium oxysporum*, предоставленного ФГБНУ ВНИИ фитопатологии.

Субстрат для эксперимента готовили из торфа и вермикулита (3:1). Торф использовали верховой, нейтрализованный со следующими качественными характеристиками: азот (NH_4+NO_3) – 0 мг/кг, фосфор (P_2O_5) – 0 мг/кг, калий (K_2O) – 0 мг/кг; массовая доля влаги не более 65%, рН водной суспензии 5,5-6,5. Закладку эксперимента проводили после предварительной стерилизации субстрата.

Источником минерального питания послужил ионитный субстрат ZION Классик следующего состава: смесь природных ионообменных активных цеолитов, азот – 4960 мг/кг, фосфор – 4730 мг/кг, калий – 11 280 мг/кг.

Инфекционный материал *Fusarium oxysporum* для заражения нарабатывали на стерильных зернах овса в течение 14 суток. После чего измельчали и добавляли в подготовленный субстрат (торф+вермикулит) в норме 7г/1л. Через 3 суток проводили визуальную оценку жизнеспособности инфекционного материала в условиях повышенной влажности через способность формирования быстрорастущего мицелия.

Провокационный фон был создан для контрольного и опытного вариантов. За контроль приняли вариант без внесения ZION Классик, за опытный вариант – внесение ZION Классик в норме 30 г/1 л субстрата.

Растения огурца выращивали в горшочках объёмом 0,5 л. В течение эксперимента растения в обоих вариантах опыта поливали водопроводной водой.

Площадь листьев измеряли с помощью программы Easy Leaf Area.

Результаты исследований

Наблюдениями установлено, что первые признаки хлороза листьев появились у растений огурца в контрольном варианте на 20-е сутки после посева, в опытном – на 28-е сутки. Изначально хлороз отмечался в центральной части листа, затем он распространялся к периферии с последующей некротизацией тканей (рис. 1).



Рис. 1. Симптомы на листьях в контроле на 20-е сутки после посева

На 20-е сутки в вариантах опыта установлена следующая распространённость выявленной симптоматики: контроль - 46%, опыт - без признаков хлороза и некроза тканей.

Развитие растений в контрольном варианте было сильно угнетено. В ходе учёта морфометрических показателей максимальные значения по количеству сформировавшихся листьев и их площади были зарегистрированы в варианте с применением ZION Классик (табл. 1, рис. 2). Здесь количество здоровых листьев было выше на 2-3 шт. и площадь 2-го настоящего листа превышала контрольный вариант на 34,7%. В результате сильного отставания в росте и развитии высота растений в контрольном варианте к 27 суткам была ниже в 1,7 раза (табл. 1).

Таблица 1. Количество, площадь листьев и высота растений огурца в условиях провокационного фона *Fusarium oxysporum* и разного фона минерального питания

Вариант опыта	Количество листьев, шт.	Площадь 2-го настоящего листа, кв. см	Высота растений, см
Контроль	5±0,5	92,7±6,9	18,8±8,8
ZION Классик	8±1,0	124,9±16,2	32,4±7,0



Рис 2. Размер второго настоящего листа (А) и состояние растений на 27 сутки (Б) в контрольном варианте (слева) и в варианте с применением ZION Классик (справа)

На 33 сутки был проведён учёт первых нарастающих плодов огурца, количество которых в контроле составило 3 шт. и в опытном варианте – 8 шт./1 растение (рис. 4). Средняя биомасса 1 плода на момент учёта в контроле была в 1,9 раза ниже в сравнении с вариантом, где применяли ионитный субстрат – 0,20 г и 0,38 г соответственно. Данные свидетельствуют о более высоком потенциале первого сбора урожая огурца в опытном варианте.



Рис. 4. Размер формирующихся плодов в контрольном (слева) и опытном (справа) варианте

Выводы

В результате проведенных предварительных исследований в условиях провокационного фона, созданного на обеднённом по минеральному питанию субстрате с внесением инфекционного материала *Fusarium oxysporum*, было установлено положительное влияние природных цеолитов, обогащенных основными элементами питания, на рост и развитие растений огурца до фазы начала налива плодов. Применение ионитного субстрата даёт пролонгированный эффект – сроки появления хлороза листьев сдвигаются на 8 суток. Отмечено, что расчётный потенциальный первый сбор плодов в лабораторном эксперименте практически в 2 раза выше с использованием ZION Классик.

Литература

- Долженко В. И. (2018) Защита растений: настоящее и будущее. *Плодородие* **1**, 24–26.
- Левитин М. М., Танский В.И., Власов Ю. И., Сколов И.М., Жаров В. Р., Гончаров Н. Р. (1999) Принципы интегрированного подхода к решению проблем защиты растений. *Вестник защиты растений* **1**, 44–50.
- Морозов Д. О., Коршунов С. А., Любовецкая А.А., Мишуров Н. П., Коноваленко Л. Ю. (2019) Современные системы интегрированной защиты сельскохозяйственных растений: науч. анализ. обзор. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 92 с.
- Geovana D. Savi, William A. Cardoso, William A. Cardoso, Bianca G. Furtado, Tiago Bortolotto (2019) Antifungal activities against toxigenic *Fusarium* specie and deoxynivalenol adsorption capacity of ion-exchanged zeolites. *Journal of Environmental Science and Health Part B Pesticides Food Contaminants and Agricultural Wastes* **53(3)**, 1-7 / <http://dx.doi.org/10.1080/03601234.2017.1405639>
- Ruchi Tripathi, Rashmi Tewari, Singh K. P., Chetan Keswani, Tatiana Minkina, Anoop Kumar Srivastava, Ugo De Corato, Estibaliz Sansinenea (2022) Plant mineral nutrition and disease resistance: A significant linkage for sustainable crop protection. *Front. Plant Sci.* **13** / <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.883970>
- William A. Cardoso, Geovana D. Savi, Ana Carolina Feltrin, Carolina R.M. Marques, Everton Angioletto, Claus T. Pich, Reginaldo Geremias, Erlon Mendes, Elidio Angioletto (2018) Antimicrobial materials properties based on ion-exchange 4A zeolite derivatives. *Polish Journal of Chemical Technology* **21, 4**, 31-39 / 10.2478/pjct-2019-0036

УДК 631.412:631.74:551

ВТОРИЧНЫЕ КАРБОНАТЫ ТОРФЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВЕРХОВОГО ТИПА

Харитонов Г.В.¹, Шеин Е.В.², Крутикова В.О.^{1,3}, Климин М.А.¹

¹ИВЭП ДВО РАН, Хабаровск, Российская Федерация

gkharitonova@mail.ru

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

evgeny.shein@gmail.com

³ИТиГ ДВО РАН, Хабаровск, Российская Федерация

nm32697@gmail.com

SECONDARY CARBONATES IN PEAT DEPOSITS OF THE UPPER TYPE

Kharitonova G.V.¹, Shein E.V.², Krutikova V.O.^{1,3}, Klimin M.A.¹

¹IWEP FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation

²Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

³ITIG FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation

Annotation: The article presents the results of a study of the upper type peat deposits (Туарка peat section, Khabarovsk region). The formation of vaterite toroidal microforms of spiral chirality up to 10 microns in size established. Their size, morphology and stability depend on the geomagnetic excursions of the Earth.

Введение

Вторичные карбонаты (размеры и морфология их выделений) — важные индикаторы режимов, процессов и условий функционирования эдафических компонентов экосистем (почвы, речные взвеси и донные отложения) как современных, так и существовавших ранее. Образуются они и в торфяных отложениях низинного типа в результате поступления кальция с грунтовыми водами. В торфяных отложениях верхового типа при крайне малом содержании минеральных веществ (питание за счет атмосферных осадков) и кислой реакции среды их образование представляется маловероятным. Тем не менее, наши исследования магнитной фракции образцов торфа верхового типа (Нижнее Приамурье, Хабаровский край) методами электронной микроскопии было зафиксировано единичное проявление карбоната кальция в виде тороида хиральной супраструктуры спиральной морфологии из гексагональных пластинчатых кристаллитов (Kharitonova et al., 2019). Ранее подобные супраструктуры карбоната кальция были получены в лабораторных условиях (Jiang et al., 2017) при низких концентрациях ионов кальция и карбонат-ионов в присутствии хиральных кислых аминокислот Asp и Glu. Авторами было доказано, что пластинчатые кристаллиты тороидов представлены ватеритом (наименее устойчивый в обычных условиях

полиморф карбоната кальция). Целью данной работы являлось подтверждение возможности образования вторичных карбонатов в торфяных отложениях верхового типа и поиск возможных механизмов их образования.

Объекты и методы

Для доказательства образования и устойчивости тороидных ватеритовых структур в торфяных отложениях верхового типа нами был изучен один из самых мощных в Приамурье (Хабаровский край, Россия) торфяник. Торфяной массив (400×200 м², посередине бугор пучения) является частью обширной заболоченной низменности с отметками 20–70 м над уровнем моря. Торфяник относится к верховому типу, осушен открытыми каналами. Разрез Тяпка (р. 1-20) заложен в междуречье рек Тяпка и Тывлинка, недалеко от Сахалинского залива Охотского моря (53.69° с.ш., 140.09° в.д.). Отбор образцов проводили послойно (каждые 2 см) до подошвы торфяных отложений (390–395 см). Выбор местоположения разреза, отбор и подготовка образцов к анализу проводились совместно с ИТиГ ДВО РАН (Peskov, A.Y., Didenko, A.N., Karetnikov, A.S. et al., 2023). В данной работе были проанализированы образцы из слоев, возраст которых совпадает со временем геомагнитных экскурсов Земли “Этрессия” и “Соловки”, “мерзлотного” слоя и смежных с ними (12–14, 94–96, 166–168, 176–178, 190–192, 198–200, 22–224, 282–284, 294–296, 302–304, 346–348, 390–392 см).

Основной метод исследования – сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), был дополнен радиоуглеродным датированием образцов профиля. СЭМ анализ проведен с использованием электронного микроскопа VEGA 3 LMN (TESCAN, Czech Republic), напыление Pt, увеличение до 25000. Подготовка образцов торфа для СЭМ анализа включала высушивание, растирание в немагнитной ступке с последующим выделением магнитной фракции с помощью постоянного магнита (Nd₂Fe₁₄B). Энерго-дисперсионный спектрометр X-max 80 (Oxford Instrument, UK) был использован для анализа элементного состава наиболее представительных участков. Физико-химические свойства образцов были определены общепринятыми методами. Исследования вещественного состава торфяных отложений и их магнитных фракций были проведены в аналитических центрах ИВЭП и ИТиГ ДВО РАН (г. Хабаровск), радиоуглеродное датирование образцов торфа выполнено в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск).

Результаты и обсуждение

Согласно полученным данным, слабоминерализованные отложения верхового болота характеризуются низкой зольностью (Az) и кислой реакцией среды – варьирование значений Az, рНводн и рНсол составило 0.90–3.06, 3.45–4.06 и 2.48–3.06% соответственно. Тем не менее, во всех образцах до подошвы торфяных

отложений возраста ~11500 кал. л.н. (BP) (Bazarova et al., 2008; Peskov et al., 2023). были диагностированы далеко не единичные проявления карбоната кальция в виде тороидов R-спиральной морфологии (right-handed, против часовой стрелки) из гексагональных пластинчатых кристаллитов ватерита (Рис. 1а). Их внешний диаметр составил ~10–11 мкм, радиус поперечного сечения – ~2 мкм с толщиной отдельных пластин ватерита около 0.1 мкм.

Детали механизма формирования подобных спиральных супраструктур карбоната кальция не вполне ясны, но их R-спиральная морфология (преобладающая в разрезе) в основных слоях профиля, соответствующая хиральности природных аминокислот и биомолекул, свидетельствует в пользу биологического механизма их образования. Размер внутреннего “ахирального” ядра тороидов позволяет предполагать бактериальную природу последних. Большое соотношение площади поверхности к объему делает бактерии идеальным местом зарождения кристаллов. Их поверхности повышают степень насыщения за счет локального притяжения катионов, действуют как темплат и катализатор образования критических зародышей. Осаждение малорастворимых веществ, карбоната кальция в том числе, на бактериальной поверхности может происходить даже в неблагоприятных условиях, таких как кислая среда (Hoffmann, Bianca, 2021).

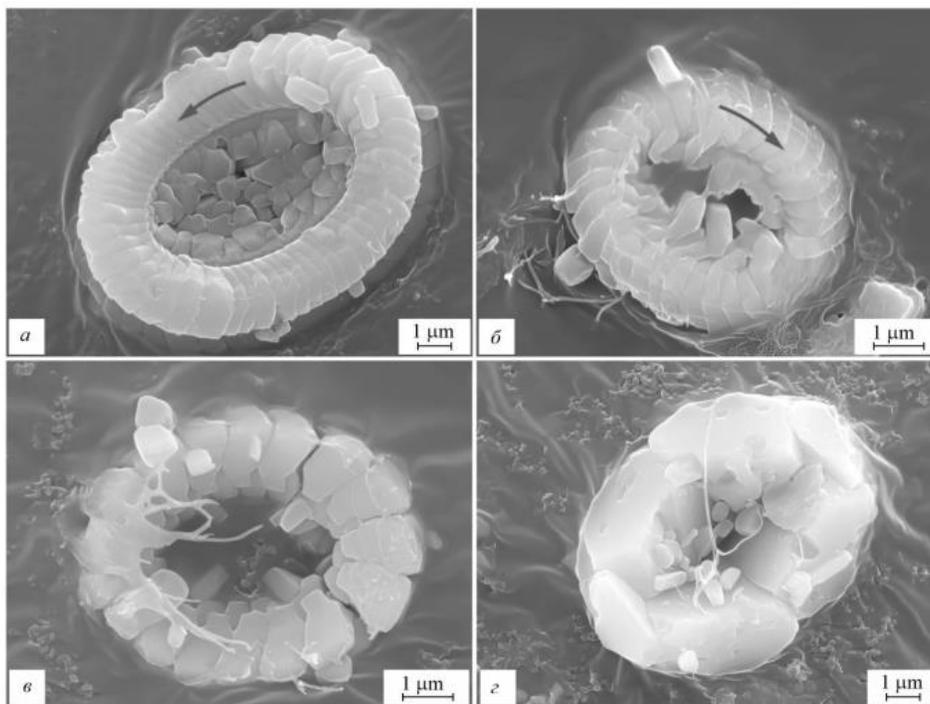


Рис.1. Микрофотографии вторичных карбонатов магнитной фракции торфяных отложений (р. Тяпка): а, б – слой 94–96 см (стрелки – R- и L-спирали кристаллитов ватерита в тороидах, а и б соответственно); в, г – слой 176–178 см, (СЭМ, BSE –детектор)

Важно отметить, что в образцах времени геомагнитных экскурсов “Этруссия” и “Соловки” и в “мерзлотном” слое (образцы 94–96, 294–296 и 176–178 см соответственно) дополнительно были диагностированы тороиды L-спиральной морфологии (left-handed, по часовой стрелке), обозначения R и L по Jiang с соавторами (Jiang et al., 2017). Размеры их несколько меньше: внешний диаметр составил ~6 мкм, радиус поперечного сечения – ~1.5 мкм, толщина отдельных кристаллитов ватерита варьирует 0.05–0.15 мкм (Рис. 1б).

В этих же “аномальных” слоях были диагностированы тороиды перекристаллизации ватерита в кальцит (Рис. 1в, г). Изменение морфологии, размера и устойчивости супраструктур при экскурсах магнитного поля Земли вкупе с геометрией “ахирального” ядра тороидов позволяет выдвинуть гипотезу участия в их образовании кокковидных магнитотаксических бактерий. Как все магнитотаксические бактерии, они обладают свойством магнитотаксиса (способность ориентации в магнитном поле). Кроме того, согласно данным просвечивающей электронной микроскопии, по экватору их шарообразной клетки расположена пара одинарных или двойных цепочек магнитосом. Магнитный дипольный момент клетки достаточно велик, так что его взаимодействие с геомагнитным полем Земли преодолевает тепловые силы, которые, как правило, хаотизируют ориентацию клетки в среде (Bazylinski, Frankel, 2004; Pósfai N., Dunin-Borkowski R.E., 2009). Концентрация тороидов L-спиральной морфологии в “мерзлотном” слое, где было обнаружено их наибольшее количество, не противоречит предлагаемой гипотезе – слой служил своеобразным барьером при таянии мерзлоты.

Выводы

Исследования торфяных отложений верхового типа (разрез Тяпка, Хабаровский край) показали, что они являются перспективным объектом изучения образования вторичных карбонатов в результате жизнедеятельности бактерий. В них более полно по сравнению с почвенными объектами, где минеральная матрица преобладает, можно оценить участие и вклад бактерий в образование вторичных карбонатов.

Полученные нами данные свидетельствуют об образовании тороидальных микроформ ватерита (наименее устойчивая и наиболее растворимая в обычных условиях полиморфная модификация карбоната кальция) спиральной хиральности размером до 10–11 мкм по всему профилю разреза до подошвы торфяных отложений возраста ~11500 кал. л.н., ВР). Изменение морфологии новообразований (R- на L-спиральную), размера и устойчивости образованных супраструктур при экскурсах магнитного поля Земли вкупе с геометрией “ахирального” ядра тороидов позволяет выдвинуть гипотезу участия в их образовании кокковидных магнитотаксических бактерий.

Литература

- Bazylnski D.A., Frankel R.B. (2004) Magnetosome formation in prokaryotes. *Nature Reviews Microbiology* **2**, 217-230. <https://doi.org/10.1038/nrmicro842>
- Bazarova V.B., Klimin M.A., Mokhova L.M., Orlova L.A. (2008) New pollen records of Late Pleistocene and Holocene changes of environment and climate in the Lower Amur River basin, NE Eurasia. *Quaternary International* **179(1)**, 9-19. doi: 10.1016/j.quaint.2007.08.015
- Hoffmann T.D., Reeksting B.J., Gebhard S. (2021) Bacteria-induced mineral precipitation: a mechanistic review. *Microbiology* **167(4)**, 001049. <https://doi.org/10.1099/mic.0.001049>
- Kharitonova G.V., Shein E.V., Krutikova V.O. et al. (2019) Secondary carbonates in edaphic components of ecosystems. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **368**, 012020. doi: 10.1088/1755-1315/368/1/012020.
- Peskov, A.Y., Didenko, A.N., Karetnikov, A.S. et al. (2023). Peat Deposits as a New Source of Paleomagnetic Records in the Holocene as Exemplified by the Etrussia Excursion. *Dokl. Earth Sci.* **512**, 878-886. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23601037>
- Pósfai N., Dunin-Borkowski R.E. (2009) Magnetic Nanocrystals. *Elements* **5**, 235-240. <https://doi.org/10.2113/gselements.5.4.235>

УДК 631.431

ОСОБЕННОСТИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АГРОСЕРЫХ ПОЧВ ВЛАДИМИРСКОГО ОПОЛЬЯ

Хирк А.В.¹, Хайдапова Д.Д.¹, Карпова Д.В.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
khirkav@my.msu.ru

FEATURES OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF AGROGRAY SOILS OF VLADIMIR OPOLYE

Khirk A.V.¹, Khaidapova D.D.¹, Karpova D.V.¹

¹Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University

Annotation: The rheological properties of agro-gray soils of Vladimir Opolye were studied using the amplitude sweep method on an MCR-302 rheometer (Anton Paar). The following rheological parameters were measured and analyzed: LVE-range, Storage Modulus, Shear Stress, and Crossover. The correlations carried out between rheological parameters and the content of various fractions of the granulometric composition showed a significant dependence of shear resistance with the content of large fractions and significant inverse dependences of the elastic modulus with the content of fractions 0.5-0.25 mm and 0.005-0.001 mm.

Введение

Основой устойчивости структуры почвы является взаимодействие почвенных частиц. От того какие связи образовались между частицами будет зависеть прочность агрегатов и почвы в целом. На прочность связей влияет содержание гумусовых веществ, соотношение гранулометрических фракций, которое по-разному взаимодействуют между собой, содержание солей и карбонатов в почве. Разное соотношение этих компонентов в почвах ведёт к тому, что они по-разному реагируют на оказываемое давление и проявляют разные реологические свойства.

Агросерые почвы Владимирского Ополья отличаются от зональных дерново-подзолистых почв высоким плодородием и поэтому активно используются в земледелии. Агросерые почвы отличаются от аллювиальных и дерново-подзолистых почв высоким содержанием крупной (около 40%) и средней (10-15%) пыли, а также и повышенными количествами илистой фракции от 10 до 19% (Окорков и др., 2010), а значит и характер взаимодействий между почвенными частицами у них различный. Дерново-подзолистые почвы характеризуются небольшим диапазоном линейного вязкоупругого поведения, не превышающим 0.007% деформации. (Клюева, Хайдапова, 2017). При этом в дерново-подзолистых почвах наблюдается четкая дифференциация значений реологических показателей между гумусовым и элювиальным горизонтом. Почвы с небольшим содержанием углерода имеют более жесткие межчастичные контакты и, соответственно, меньшую область упруго-

пластичного поведения. В агросерых почвах также происходит процесс оподзоливания, однако он не так ярко выражен, как в дерново-подзолистых почвах, поэтому целью этой работы было сравнить реологические свойства разных горизонтов агросерых почв. В почвах Владимирского Ополя высоко содержание гумуса, а по структурным показателям они могут быть близки к чернозёмам, но сравнение реологических свойств пахотного горизонта агросерой почвы Владимирского Ополя и агрозёма Курской области показало, что агросерые почвы по сравнению с агрочерноземами обладают меньшей устойчивостью к нагрузкам (диапазон упругого поведения), и в 2 раза быстрее переходят в вязкотекучее состояние по сравнению с агрочерноземами при деформационных нагрузках (Хайдапова, 2022)

Объекты и методы

Объектами исследования являлись почвы Владимирского Ополя производственного поля ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ»: агросерая типичная, агрозём текстурно-дифференцированный, расположенные на небольшом склоне и агросерая глееватая почва ложбины. В таблице 1 представлены некоторые характеристики почв.

Таблица 1. Характеристика горизонтов агросерых почв

Название (Классификация почв России, 2004)	Горизонт (см)	Гумус*, %	Плотность, г/см ³
агросерая типичная глубокопахотная среднесуглинистая почва	P 0-42	3.57	1,29±0,01
	BEU 42-60	0.51	1,51±0,01
	BT 60-85	0.85	1,50±0,01
агрозём текстурно-дифференцированный языковатый среднепахотный среднесуглинистый	P 0-30	2.04	1,37±0,02
	BTy 30-85	0.68	1,50±0,02
агросерая глееватая мелкопахотная среднесуглинистая почва	P 0-20	2.55	1,39±0,02
	BEUg 20-38	2.21	1,48±0,01
	BTg 38-75	0.34	1,49±0,02

*Содержание органического вещества определялось по методу Тюрина (ГОСТ 26213-91)

Агросерая типичная, почва отличалась мощным темноокрашенным пахотным горизонтом с комковато-зернистой структурой. Под ним находился горизонт BEU со множеством белёсых языков с призматически-плитчатой структурой, и ореховатыми отдельностями между ними. Горизонт BT имел столбчато-ореховатую структуру с коричневыми кутаны по граням структурных отдельностей.

В агрозёме текстурно-дифференцированном были выделены два горизонта: пахотный, комковато-зернисто-порошистой структуры и горизонт BTy со

столбчато-мелкоореховатой структурой с обильными коричневыми кутанами по граням структурных отдельностей с языками отбеленного материала.

Агросерая глееватая почва в ложбине имела пахотный горизонт однородной темно-серой окраски, комковато-зернистой структуры. Горизонты BELg и BTg имеют признаки оглеения в виде неоднородной окраски пятнистой окраски и редких железистых стяжений.

Гранулометрический и микроагрегатный составы почв определены методом лазерной дифракции (ЛД) частиц на лазерном анализаторе Microtrac Bluewave (Microtrac, США) (Юдина и др., 2017). Образцы были растерты резиновым пестиком и просеяны через сито 1мм. Перед определением гранулометрического состава пробу суспендировали (20 мг почвы в 15 мл дистиллированной воды) и обрабатывали ультразвуком на диспергаторе зондового типа Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США) со стандартным наконечником при энергии диспергации 500 Дж/мл. Для микроагрегатного анализа пробы суспендировали в дистиллированной воде и встряхивали на вортексе (Yudina et al., 2022). В таблице 2 представлены данные гранулометрического и микроагрегатного анализов

Таблица 2. Содержание гранулометрических фракций (ПЧ) и микроагрегатов (МА), % (метод лазерной дифрактометрии)

почва	горизонт	*	Размер частиц (мм)						
			1.0-0.5	0.5-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	<0.001
агросерая типичная	P	ПЧ	0.2	0.5	10.6	46.6	12.6	22.5	7.0
		МА	0.4	0.9	17.6	59.1	10.0	10.6	1.3
	BEL	ПЧ	0.1	0.5	8.0	47.4	13.2	22.2	8.8
		МА	0.4	0.9	15.2	57.8	10.7	13.0	2.0
	BT	ПЧ	0.1	0.5	8.8	47.7	11.7	21.3	10.0
		МА	0.5	1.0	19.0	55.5	9.5	12.3	2.3
агрозём языковатый	P	ПЧ	0.2	0.6	9.3	45.0	13.8	24.8	6.4
		МА	0.5	1.0	14.9	59.0	10.5	12.0	2.1
	BTy	ПЧ	0.1	0.5	7.3	46.2	13.0	22.5	10.5
		МА	0.4	0.9	17.4	55.8	10.3	13.2	2.0
агросерая глееватая	P	ПЧ	0.2	0.5	8.3	44.3	14.1	25.4	7.4
		МА	0.5	1.2	15.9	58.2	11.4	11.9	0.9
	BELg	ПЧ	0.2	0.5	9.6	48.6	12.8	22.2	6.1
		МА	0.5	1.2	18.1	56.8	10.6	11.8	1.0
	BTg	ПЧ	0.2	0.5	9.3	42.1	12.4	24.0	11.6
		МА	0.4	1.0	15.1	55.2	11.3	14.6	2.4

* ПЧ – почвенные частицы, МА – микроагрегаты

Реологические свойства почв изучали методом амплитудной развертки на модульном компактном реометре MCR-302 (Anton Paar, Австрия) с измерительной системой параллельных плато PP-25. Параметры измерения: программа Start Rheoplus - режим Amplitude Sweep, количество точек измерения - 30, длительность измерения одной точки - 15 с, угловая частота измерения - 0.5 Гц, диапазон деформации (напряжения). от 0.001 до 100% I_g , контроль нормальной силы (сила воздействия верхнего плато) $NF < 5 N$ для пастообразных образцов, постоянная температура 20°C. Постоянство температуры обеспечивали элементами Пельтье (Хайдапова и др., 2014).

Реологические свойства определялись в насыщенных пастах. При подготовке паст почвенные образцы были растёрты пестиком с резиновым наконечником и просеяны через сито 1 мм. В цилиндры с диаметром 25 мм и водопроницаемым дном, поместили 3 г воздушно-сухого образца. Затем поверхность образца выравнивается и уплотняется слабым надавливаем 3 раза поршнем. Затем подготовленные образцы почв капиллярно насыщались дистиллированной водой в течение суток (Хайдапова и др., 2014).

Таблица 3. Влажности насыщенных водой образцов

Почва	горизонт	W, %
агросерая типичная глубокопахотная	P	49.32
	BEL	40.89
	BT	47.17
агрозём языковатый	P	51.23
	BTy	51.87
агросерая глееватая	P	47.76
	BELg	43.00
	BTg	43.00

Были измерены и проанализированы следующие реологические параметры: диапазон упругих деформаций, который определяется двумя показателями: деформацией и значением модуля упругости, характеризующим жесткость межчастичных связей в образце, значение деформации и модуль упругости в точке наибольшего сопротивления сдвигу и значение деформации в точке пересечения кривых модулей упругости и вязкости (Mezger, 2011). До пересечения модулей почва деформируется, но остается пластичным твердым телом, а после – поведение почвы переходит из вязкоупругого в вязкое и почва может течь.

Результаты и обсуждение

Значение деформации, при которой начинается разрушение структуры у всех горизонтов больше $>0.007\%$. Значение деформации у пахотных горизонтов

агросерой почвы и агрозёма равно 0.00726% , а пахотный горизонт агросерой глееватой 0.014% с большим отклонением (0.0088) (Рис. 1а).

Большой диапазон упругого поведения (0.0108%) и высокое значение модуля упругости (997 кПа) у горизонта BEL агросерой типичной почвы (Рис. 1б) говорят о более жестких связях между частицами в этом горизонте. У горизонта BT диапазон упругого поведения несколько меньше (0.0084%) и модуль упругости (888 кПа).

У агрозёма языковатого диапазон упругого поведения частиц пахотного горизонта меньше, чем в почве горизонта BT, у которого он равен 0.0096% деформации, а модуль упругости 893 кПа. У агросерой глееватой почвы пахотный горизонт показал большой разброс в значениях диапазона упругости, горизонт BELg имеет диапазон упругого поведения 0.0121% деформации, что несколько больше, чем у горизонта BTg (0.0096%). В целом, в агросерой глееватой почвы диапазон упругого поведения больше варьирует, о чём говорит стандартное отклонение.

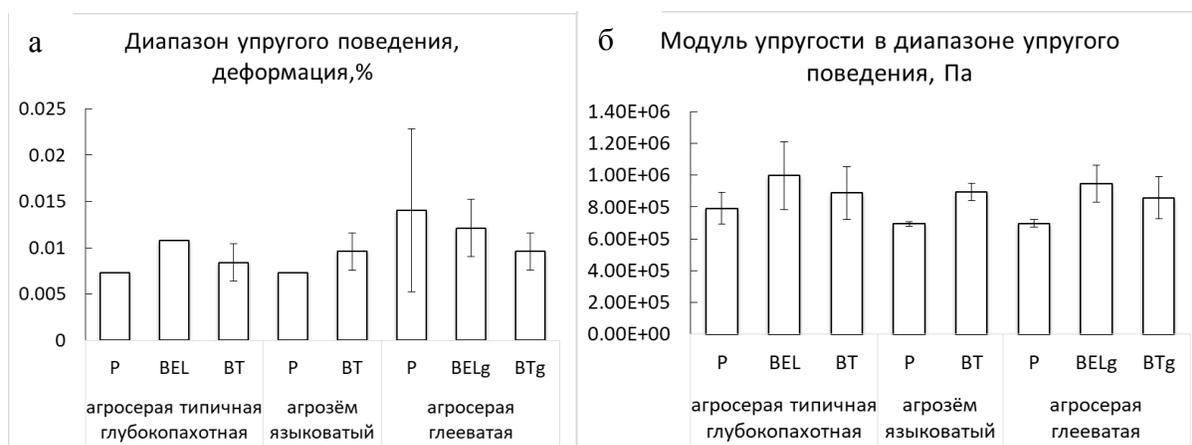


Рис. 1. Диапазон упругого поведения: а – деформация, %; б – модуль упругости в диапазоне упругого поведения, Па.

Наибольшее сопротивление сдвигу варьирует от 559 до 755 Па для всех исследованных почв (Рис.2 б). Самое низкое значение деформации при которой происходит максимальное сопротивление сдвигу (Рис. 2 а) у частиц почвы горизонта BEL (0.174%), сопротивление сдвигу при этом также наименьшее 559 Па. Наибольшим сопротивлением сдвигу отличается почва горизонта BELg - 754 Па при деформации $0,384\%$.



Рис. 2. Сопротивление сдвигу: а – деформация при максимальном сопротивлении сдвигу, %; б – максимальное сопротивление сдвигу, Па.

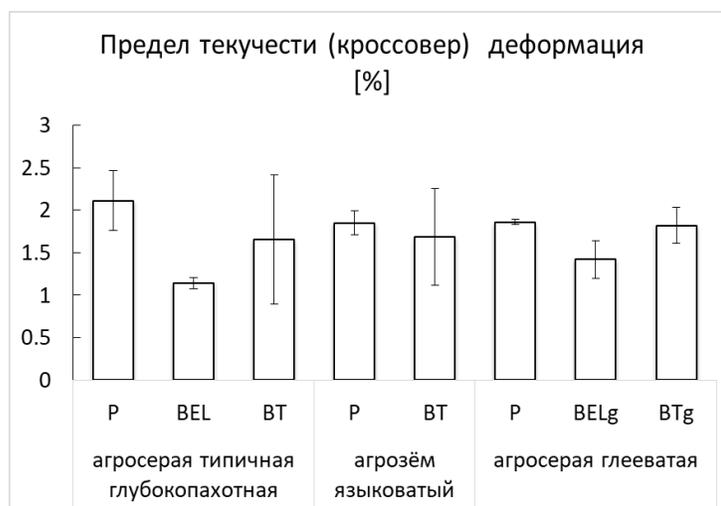


Рис. 3. Процент деформации при пересечении модулей упругости и вязкости (предел текучести).

Ещё одна важная точка – точка пересечения модулей упругости и вязкости (мы ее назовем предел текучести), характеризует переход из пластичного состояния в вязко текучее (Рис. 3). Чем при больших значениях деформации происходит пересечение модулей, тем устойчивее связи между частицами и больше диапазон пластичного поведения. Самое большое значение деформации при которой наступал предел текучести наблюдалось у пахотного горизонта агросерой типичной (2.112%) у двух других пахотных горизонтов предел текучести произошёл при 1.85% деформации. Самое низкое значение предела текучести в почве горизонта BEL агросерой типичной 1.14% деформации. Почва горизонта BT показала широкий

разброс значений предела текучести, в среднем 1.65%. У агрозёма языковатого значение деформация предела текучести у частиц пахотного и подпахотного горизонтов близко и составляет 1.85% и 1.68% соответственно. В агросерой глееватой почве предел текучести горизонтов Р и ВТ приблизительно равен и составляет 1.85% и 1.82% соответственно. Предел текучести в почве горизонта ВЕLg наступает при деформации 1,42% кроссовер произошёл раньше, что означает устойчивость структуры горизонта ВЕLg ниже, чем у пахотного и иллювиального горизонтов.

Были рассчитаны корреляции между реологическими свойствами и почвенными показателями: содержанием гумуса, гранулометрическим составом и коэффициентом дисперсности (отношение частиц <0.001 мм при гранулометрическом анализе к частицам <0.001 мм при микроагрегате анализе в процентах). Диапазон упругого поведения обратно коррелирует с значением дисперсности (-0.7), что означает, что в хорошо микроагрегированной почве диапазон упругости меньше. При этом значение модуля упругости в диапазоне упругости отрицательно коррелирует с содержанием частиц 0.5-0.25 мм (-0.7) и частицами 0.005-0.001 мм (-0.8). Деформация при максимальном сопротивлении сдвигу положительно коррелирует с содержанием фракции (1.0-0.5), но при этом модуль упругости отрицательно коррелирует с содержанием этой фракции (-0.7). Таким образом, крупные частицы оказывают большее сопротивление сдвиговым деформациям. Интересно, что с содержанием гумуса значимо не коррелирует ни один показатель, однако, прослеживается тенденция обратной зависимости (-0,6) со значением модуля упругости и прямой зависимости (0,6) с величиной предела текучести, что позволяет предположить увеличение содержания органического вещества снижает прочность межчастичных связей и увеличивает диапазон пластичного поведения. Большую роль в реологических свойствах горизонтов агросерых почв имеет гранулометрический состав, особенно содержание крупных фракций и микроагрегированность.

Таблица 3. Корреляции деформации и модуля упругости с некоторыми показателями

Показатель	p < .05 N=8				
	Гумус	1.0-0.5	0.5-0.25	0.005-0.001	Дисперсность
Деформация (область упругого поведения)	0.0	0.0	-0.4	0.3	-0.7
Модуль упругости (область упругого поведения)	-0.6	-0.69	-0.7	-0.8	-0.1
Деформация (наибольшее сопротивление сдвигу)	0.4	0.8	0.6	0.6	-0.2
Модуль упругости (наибольшее сопротивление сдвигу)	-0.5	-0.7	-0.69	-0.69	0.0
Деформация (Предел текучести)	0.6	0.6	0.6	0.5	0.0

Выводы

Значение деформации, при которой начинается разрушение структуры у всех горизонтов больше $>0.007\%$. У пахотных горизонтов агросерой почвы меньше диапазон упругого поведения и значение модуля упругости, чем у горизонтов ВЕL и ВТ. Большой диапазон упругого поведения и высокое значение модуля упругости горизонта ВЕL говорят о более жестких связях между частицами в этом горизонте, из-за процессов оподзаливания.

Точка деформации с максимальным сопротивлением сдвигу почти у всех горизонтов была близка к 0.38% , кроме горизонтов ВЕL и ВТ агросерой типичной почвы, при этом модуль упругости у этих горизонтов был выше, чем в остальных почвах, что свидетельствует о более хрупком характере структуры этих горизонтов.

Переход от пластичного к вязкому поведению произошел позже у пахотного горизонта агросерой типичной, чем у двух других пахотных горизонтов, что говорит о большей устойчивости этого горизонта к нагрузкам. Самое низкое значение деформации, при которой наступил предел текучести у горизонта ВЕL агросерой типичной 1.14% деформации, что ещё раз подтверждает неустойчивость структуры этого горизонта в результате процесса оподзаливания. У агрозёма языковатого значения предела текучести для пахотного и подпахотного горизонтов близко, здесь не происходит активного оподзаливания, которое бы влияло на связь между частицами. У агросерой глееватой почвы предел текучести горизонтов Р (1.85%) и ВТ (1.82%) наблюдается при близком значении деформации, а у горизонта ВЕLg при значении деформации ниже (1.42%), что означает устойчивость структуры горизонта ВЕLg ниже, чем у пахотного и иллювиального горизонтов.

В результате корреляционного анализа выявлено, что с содержанием гумуса значимо не коррелирует ни один показатель, однако, прослеживается тенденция обратной зависимости ($-0,6$) со значением модуля упругости и прямой зависимости ($0,6$) с величиной предела текучести, что позволяет предположить увеличение содержания органического вещества снижает прочность межчастичных связей и увеличивает диапазон пластичного поведения. Большую роль в реологических свойствах горизонтов агросерых почв имеет гранулометрический состав, особенно содержание крупных фракций и микроагрегированность.

Благодарность

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного по Программе развития МГУ

Литература

Клюева В.В., Хайдапова Д.Д. (2017) Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой

- почвы. *Бюл. Почв. ин-та.* **89**, 21-35. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-21-35>
- Окорков В. В. (2010) Гранулометрический состав почв и его роль в устойчивости к водной эрозии. *Владимирский Земледелец.* **3**, 17-19.
- Шейн Е.В., Початкова Т.Н., Холодков А.И. (2016) Реологические свойства дерново-подзолистой почвы. *Вестник ОГУ.* **6 (194)**, 86-89.
- Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Честнова В.В. (2014) Оценка реологическими методами восстановления структуры почв под влиянием выращивания лесополос на антропогенно нарушенных почвах *Вестник АГАУ.* **6 (116)**, 53-57.
- Хайдапова Д.Д., Мищенко А.В., Карпова Д.В. (2022) Реологические свойства почв как одна из характеристик физической среды обитания растений. *Агрофизика.* **1**, 17-21. <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2022.01.03>.
- Юдина А.В., Милановский Е.Ю. (2017) Микроагрегатный анализ почв методом лазерной дифракции: особенности пробоподготовки и интерпретации результатов. *Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева.* **89**, 3–20.
- Mezger T.G. (2011) *The Rheology Handbook.* 3-rd Revised Edition, Hanover, Germany. 436.
- Yudina A.V., Klyueva V.V., Romanenko K.A., Fomin D.S. (2022) Micro- within macro: How micro-aggregation shapes the soil pore space and water-stability. *Geoderma.* **415**, 115-177. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115771>

УДК:631.43

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ ЕСТЕСТВЕННОГО И НАРУШЕННОГО СЛОЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТИПИЧНОЙ ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

Холопов Ю.В.¹, Хайдапова Д.Д.², Лаптева Е.М.¹

¹ Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН
Yuraholopov@yandex.ru

² Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

Methodological features of determining the rheological properties of soils of natural and disturbed composition on the example of a typical podzolic soil

Kholopov Yuriy¹, Khajdapova D.D.², Lapteva E.M.¹

¹Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

²Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University

Annotation: Comparative analysis of the podzolic soil rheological properties in samples of the homogenized (disturbed paste-like) and naturally (undisturbed) structured form was performed using amplitude sweep test. Studies showed the rheological properties of soil samples with natural structure and in the form of paste-like form are very similar, despite different quantitative indicators. The organic (O) horizon of the forest litter showed the most resistant properties to mechanical loads. Soil monolith samples with natural (undisturbed) structure are characterized by higher strength and rigid structural relationships but rigidity of monoliths coupled with higher brittleness. Homogenized soil (paste-like) samples showed lower strength but higher plasticity of structural relationships under deformation.

Keywords: rheology, structure, strain, podzolic soil, Dystric Albic Retisol

Введение

Развитие любой науки сопряжено с постоянным обновлением методической и приборной базы, что открывает новые аспекты в описании и познании объектов исследований. Реология как наука направлена на исследование и описание процессов деформации и текучести материалов (Рейнер, 1965). Для таких исследований, безусловно, необходимо специальное оборудование: реометры, вискозиметры, пластометры. За последние десятилетия в реологии появился целый спектр специальных приборов – реометров, позволяющих на высоком уровне выполнять реологические исследования, что активно внедряется и при изучении физики почв. Например, применяемый на реометрах серии MCR «Anton Paar» метод амплитудной развертки или колебательный метод рекомендован многими специалистами при выполнении реологических исследований природных дисперсных объектов, в том числе почв (Horn, Smucker, 2005; Markgraf et al., 2006;

Шейн и др., 2015; Pertile et al., 2016; Хайдапова и др., 2016). Метод амплитудной развертки имеет ряд преимуществ перед другими подходами: при испытаниях не требует большой массы образца, позволяет исследовать как пасты (растертые образцы почв), так и ненарушенные пробы (монолиты). Кроме того, есть возможность контроля температуры, что существенно повышает точность получаемых данных и расширяет спектр исследовательских возможностей. Ранее проведенные исследования (Холопов и др., 2018) показали, что данный метод требует некоторой доработки и унификации с методами, используемыми другими авторами. В частности, D. Holthusen с соавторами (2019), В.В. Ключева, Д.Д. Хайдапова (2017) при реологических испытаниях почвенных проб рекомендуют использовать не только растертые гомогенизированные образцы почв, но и ненарушенные монолитные пробы. В связи с повышенной жесткостью почвенных монолитов, зарубежные исследователи (Teamrat A. et al., 2001; Holthusen et al., 2017; Pértile et al., 2018), как правило, используют при испытаниях шершавые или ребристые поверхности на параллельных измерительных плоскостях прибора. Такой подход применяют для более эффективного взаимодействия и исключения проскальзываемости плоского измерительного плато по поверхности почвенной пробы. Как следствие, результаты, полученные нами и зарубежными авторами, несколько отличаются, так как мы используем растертые образцы и гладкие измерительные плоскости. Таким образом, целью настоящей работы стала оценка результатов реологических испытаний образцов среднетаежной подзолистой почвы в нарушенном (пастообразные) и ненарушенном (монолиты) виде во взаимосвязи с их физико-химическими свойствами.

Объекты и методы

Объектом исследования послужила подзолистая с микропрофилем подзола почва супесчано-/тяжелосуглинистого гранулометрического состава, сформированная на покровном суглинке (Dystric Albic Retisol) (Классификация..., 2004; World reference..., 2015). Разрез заложен в подзоне средней тайги, в ельнике чернично-зеленомошном, в 6 км западнее г. Сыктывкара. Климат района исследований умеренно-холодный умеренно-континентальный (Атлас Республики Коми..., 1997).

Физико-химические свойства почв исследовали стандартными методами (Теория и практика химического..., 2006).

Реологические исследования образцов почв выполняли на базе модульного реометра MCR-302 «Anton Paar» (Австрия) методом амплитудной развертки (колебательный метод) с измерительными системами «плато-плато». Подробное описание методики проведения исследований представлено в работах (Markgraf et al., 2012; Шейн и др., 2014; Хайдапова и др., 2016; Stoppe N., Horn R., 2018). Оценивали следующие параметры характеризующие реологические свойства почв:

G' (Pa) – модуль накопления; G'' (Pa) – модуль потерь; LVE–range (%) – предел упругой деформации; CROSSOVER (%) – предел текучести; $\tau_{\text{макс}}$ – максимальное напряжение сдвига при деформации. Анализировали образцы подзолистых почв в нарушенном (пастообразные) и ненарушенном (монолиты) виде, в состоянии суточного капиллярного увлажнения, масса образца – 3 г. Почвенные монолиты вырезали из генетических горизонтов в ненарушенном сложении с помощью пластиковых колец высотой 1 см и диаметром 2,5 см. Для исключения проскальзываемости при испытаниях на верхнее и нижнее измерительные плато прибора приклеивали сетчатую серпянку.

Результаты и обсуждение

Характерной диагностической особенностью морфологического строения исследуемой подзолистой почвы тайги является сочетание элювиального облегченного горизонта (EL), характеризующегося наличием микропрофиля подзола (EL(e)–EL(hf)), с более тяжелым и плотным текстурным (BT) горизонтом. Текстурный горизонт (BT) в средней части профиля почв выделяется хорошо выраженной четкой призматической структурой с глинистыми натеканиями на поверхности педов и кремнеземистой присыпкой. Физико-химические свойства исследуемой почвы хорошо освещены в ранее опубликованных материалах (Забоева, 1975; Атлас почв РК, 2010; Холопов и др., 2018). В целом, рассматриваемая почва характеризуется повышенной кислотностью (3,8-4,0 ед. рН), выщелоченностью элювиальной части профиля. Почва малогумусна, с преобладанием в составе гумусовых веществ фульвокислот и отсутствием доли фракций, связанных с кальцием (Структурно-функциональная организация..., 2001). Гумусовые вещества отличаются агрессивностью по отношению к минералам и подвижностью в профиле (Шамрикова, 2013).

Реологические свойства достаточно четко отражают физико-химические особенности профиля подзолистой почвы, при этом наиболее четко эта взаимосвязь проявляется в пробах почв ненарушенного сложения.

Исследования показали, что наиболее устойчив к деформационным воздействиям верхний органогенный горизонт O, так как имеет прочную и упругую структуру с высокими значениями таких параметров, как LVE, $\tau_{\text{макс}}$ и CROSSOVER, и не разрушается до состояния текучести (Рис. 1, 2).

Как видно из графиков (Рис. 1, 2), значения модуля накопления (G'), отражающие жесткость почвенных контактов, в области упругой деформации имеют обратную взаимосвязь с динамикой величин максимального напряжения сдвига ($\tau_{\text{макс}}$). Величина $\tau_{\text{макс}}$ показывает прочность или общую устойчивость структуры почвы к деформационной нагрузке (Holthusen et al., 2019). Это говорит о том, что, чем жестче структура внутрпочвенных взаимосвязей, тем уже предел его деформационных возможностей, структура становится более хрупкой, а при

достижении предела напряжения резко разрушается без возможности полного восстановления (Holthusen et al., 2012). Об этом так же свидетельствуют низкие значения предела упругости (LVE-range) и пластичности (CROSSOVER) в горизонтах с высокими величинами модуля накопления G' (Рис. 2А, В).

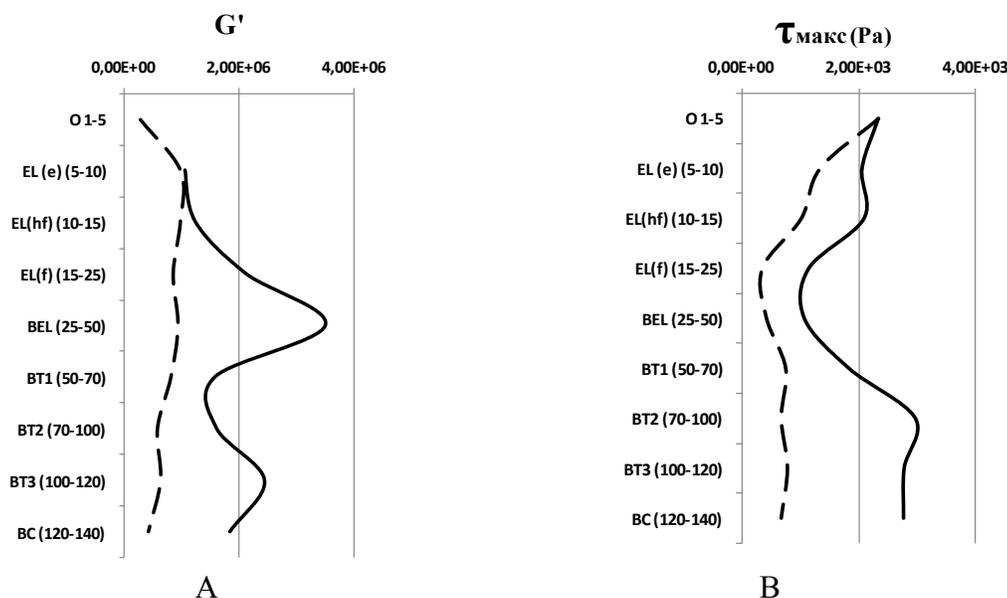


Рис.1. Распределение реологических показателей в профиле подзолистой почвы средней тайги: А – модуль накопления (G' , Па); В – максимальное напряжение сдвига ($\tau_{\text{макс}}$, Па);
- - - - - – нарушенные пробы (образцы почв в пастообразном состоянии);
————— – ненарушенные пробы (монолиты).

Fig. 1. Distribution of rheological parameters in the profile of podzolic soil of the middle taiga:
А – storage modulus (G' , Pa); В – maximum shear stress ($\tau_{\text{макс}}$, Pa);
- - - - - – homogenized soil samples;
————— – naturally structured soil samples.

В целом, образцы ненарушенного сложения (монолиты) характеризуются более высокой жесткостью и прочностью структуры, по сравнению с нарушенными (пастообразными) вариантами. Превышение значений может составлять более чем в 2 раза, что согласуется с исследованиями коллег (Клюева, Хайдапова..., 2017; Holthusen et al., 2019). Это обусловлено меньшим содержанием влаги в образце, более плотным и многоуровневым взаимодействием частиц и микроагрегатов в монолитах, нежели в пастообразных образцах. Кроме того, необходимо учитывать вклад мелких корней, которые пронизывают почву и создают внутренний прочный каркас в пробах ненарушенного сложения (монолиты). Исключением является верхний горизонт микропрофиля подзола – EL(e), где низкие значения модуля накопления (G') (Рис. 1А) указывают на слабые межчастичные взаимосвязи. Последнее, вероятно, обусловлено легким гранулометрическим составом (супесь)

данного горизонта с относительно слабыми контактами между частицами, зависящими преимущественно от площади контакта. В переходном BEL (25-50 см) горизонте отмечен максимальный уровень жесткости с высокими значениям G' , что сопряжено с накоплением здесь органо-минеральных соединений железа, фиксируемых по данным распределения в профиле соединений железа, извлекаемых вытяжками Тамма и Джексона (Холопов и др., 2018).

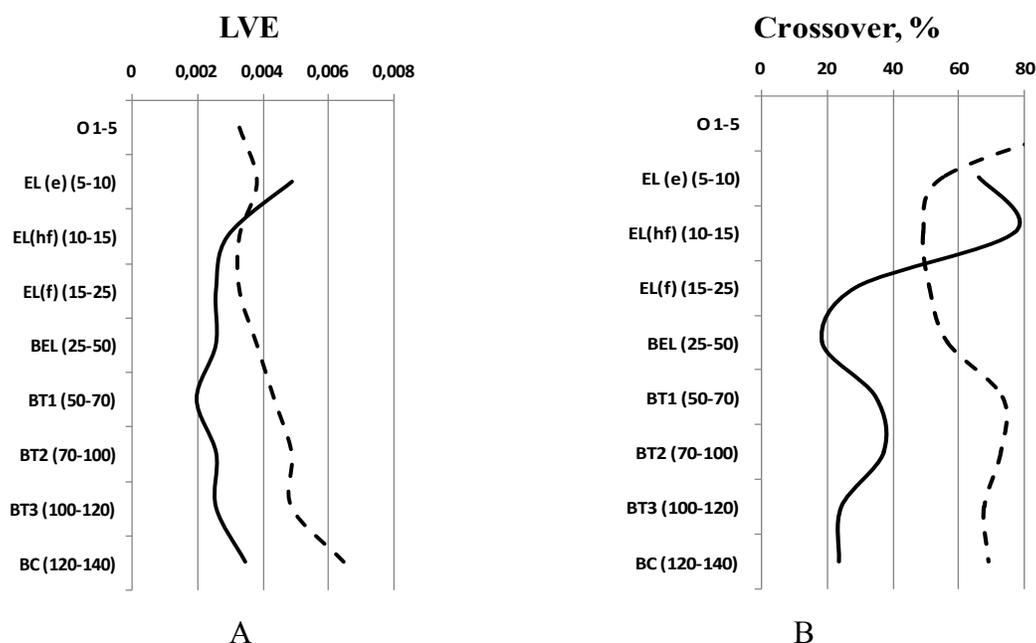


Рис.1. Распределение реологических показателей в профиле подзолистой почвы средней тайги: А – диапазон линейной вязкоупругости (LVE, %); В – предела текучести (CROSSOVER, %);

--- – Нарушенные пробы (образцы почв в пастообразном состоянии);
— – Ненарушенные пробы (монолиты).

Fig. 1. Distribution of rheological parameters in the profile of podzolic soil of the middle taiga: A – the linear viscoelastic range (LVR,%); B – yield point (CROSSOVER, %));

--- – homogenized soil samples;
— – naturally structured soil samples.

Текстурный горизонт BT служит водоупором для нисходящих потоков влаги и растворенных органических и органо-минеральных соединений. В связи с этим в вышележащем горизонте BEL создаются условия для переувлажнения и временного застоя влаги. В этих условиях органо-минеральные соединения обволакивают частицы почвы, создавая жесткие микроструктурные соединения. В то же время, в горизонте BEL отмечены наименьшие значения максимального напряжения сдвига

($\tau_{\text{макс}}$), что свидетельствует о хрупкости и слабой устойчивости структуры почвы к деформациям.

В монолитах из горизонта ВТ-ВС показатели жесткости (G') несколько ниже, что связано с гидрофильностью более тяжелой по гранулометрическому составу нижней части профиля. Присутствие влаги увеличивает расстояние между почвенными частицами, ослабляя тем самым межчастичное взаимодействие. Значения $\tau_{\text{макс}}$ в горизонтах ВТ-ВС при этом повышаются, что указывает на высокую прочность контактов.

В пробах нарушенного сложения (пастообразные) наиболее высокие значения модуля накопления (G') отмечены только для верхнего подзолистого горизонта EL(e). Стоит отметить, что значения G' в пастах из образцов EL(e) горизонта наиболее близки к показателям G' , полученным при исследовании монолитов из того же горизонта. Это указывает на то, что растирка и гомогенизация подзолистого горизонта в наименьшей степени повлияла на его реологические показатели по сравнению с другими горизонтами. На реологические показатели здесь влияют только форма частиц и площадь контактов между частицами. В горизонте EL(f) показатели G' в пастообразных образцах уже ниже, чем в монолитах, что, вероятно, обусловлено разрушением микроагрегатов, созданных на основе органо-минеральных соединений альфегумусовой природы (Stoppe, Horn, 2018). Аналогичная потеря жесткости отмечена и в переходном BEL (25-50 см) горизонте (Рис. 3А). В отличие от ненарушенного варианта, здесь нет сильного скачка значений G' вследствие разуплотнения и разрушения органо-минеральных мостиков между частицами и микроагрегатами при подготовке пробы к анализам.

Напротив, показатели предела упругости (LVE, %) и пластичности (CROSSOVER, %) (Рис. 2 А, В) в пастообразных образцах почти в 2 раза превосходят величины, полученные при исследовании монолитов. Это обусловлено формированием в нарушенных образцах большего количества контактов в результате распада микро- и макроагрегатов. Кроме того, в нарушенном (перетертом) образце почвы, особенно из иллювиальных горизонтов, частицы обладают более высокой удельной поверхностью и впитывают больше влаги (Markgraf et al., 2009; Cho et al., 2006; Ghezzehei and Or, 2001; Reichert et al., 2010). Структура становится более подвижной и пластичной, что отражается на реологических показателях. Образцы ненарушенного сложения (монолиты) дольше и в меньшей степени насыщаются влагой, в силу разнородности порового пространства и присутствия заземленного воздуха. Влажность монолитов, как правило, на 5-15% меньше пастообразных проб, что сказывается на высоких величинах жесткости (G') структурных взаимосвязей в монолитах с хрупкими и слабоупругими свойствами.

Таким образом, физико-механические исследования показали, что реологические показатели образцов ненарушенного (монолиты) и нарушенного

(пастообразные) сложения отличаются по количественным показателям более чем в 2 раза, однако, динамика показателей между горизонтами имеет близкий характер и соотношения. Наиболее устойчивым к механическим нагрузкам является верхний органогенный горизонт (O) с упругими характеристиками, сохраняющий почву от неблагоприятных последствий эрозии или смыва. Переходный ВЕL горизонт характеризуется очень жесткой, но менее устойчивой структурой с узким диапазоном деформационных возможностей. Иллювиальные горизонты ВТ отличаются пластичными и прочными свойствами. В пробах нарушенного сложения (пастообразные) реологические показатели имеют более плавный переход между горизонтами вследствие разуплотнения и общей гомогенизации пробы при подготовке к анализам. Реологические свойства паст определяются преимущественно формой частиц и площадью контактов между ними. В монолитах значительную роль играют содержание органико-минеральных альфегумусовых соединений, включения корней, мелких камней, уплотненность и влажность пробы. В реологических исследованиях почв можно использовать вариант с пастообразными образцами, но при этом перед подготовкой к реологическим испытаниям образец почвы желательнее уплотнять (Batistao, et al., 2020) до значений близких к естественным природным почвам с ненарушенным сложением с целью получения наиболее корректных результатов. Оптимальным следует считать параллельное выполнение исследования с использованием проб ненарушенного сложения (монолиты) для более четкого выявления особенностей реологического поведения между горизонтами и их связи с физико-химическими параметрами почв. Однако при использовании для анализа монолитов есть определенные трудности, связанные с их слабой и медленной смачиваемостью, наличием крупных и твердых включений, что усложняет правильную оценку реологических свойств почв. Кроме того, при использовании монолитов необходимо увеличение количества повторностей, что сильно затрудняет работу.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН: Криогенез как фактор формирования и эволюции почв бореальных и арктических экосистем европейского Северо-Востока в условиях антропогенных воздействий, глобальных и современных региональных климатических трендов. Регистрационный номер: 122040600023-8.

Литература

Атлас почв Республики Коми (2010) Под ред. Г. В. Добровольского, А. И. Таскаева, И. В. Забоевой. – Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 356 с.
Атлас Республики Коми по климату и гидрологии (1997) Ред. А. А. Братцев, А. П. Братцев и др.; Отв. ред. А.И. Таскаев. – М.: Дрофа; Дик, 115 с.

- Забоева И. В. (1975) Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар: Коми книжное издательство, 344 с.
- Клюева В. В., Хайдапова Д. Д. (2017) Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы. *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева* **89**, 21-35. doi: 10.19047/0136-1694-2017-89-21-35.
- Клюева В. В. (2015) Современные приборные методы исследования гранулометрического состава, реологических характеристик и свойств поверхности твердой фазы почв. *Вестник Оренбургского университета* **181**, 6, 140–145.
- Рейнер М. (1965) Реология: пер. с англ. – М.: Наука, 224 с.
- Структурно-функциональная организация почв и почвенного покрова Европейского Северо-Востока (2001) Отв. ред. Ф. Р. Зайдельман, И. В. Забоева. – СПб.: Наука, 224 с.
- Теория и практика химического анализа почв (2006) Под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 400 с.
- Холопов Ю. В., Хайдапова Д. Д., Лаптева Е. М. (2018) Физико-механические свойства автоморфных таежных почв Республики Коми (по данным реологических исследований). *Вестн. Том. гос. ун-та. Биология* **42**, 24–53.
- Хайдапова Д. Д., Честнова В. В., Шеин Е. В., Милановский Е. Ю. (2016) Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании. *Почвоведение* **8**, 955–963.
- Шамрикова Е. В. (2013) Кислотность почв таежной и тундровой зон Европейского Северо-Востока России. – СПб.: Наука, 160 с.
- Cho, G.-C., Dodds, J., Santamarina, J.C., (2006). Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* **132**, 591–602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090_0241\(2006\)132:5\(591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090_0241(2006)132:5(591)).
- Ghezzehei, T.A., Or, D. (2001). Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65**, 624. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653624x>.
- Holthusen, D., Pertile P., Reichert J. M., Horn R. (2019) Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions. *Soil Tillage. Res.* **191**, 282–293.
- Holthusen, D.; Jänicke, M.; Peth, S.; Horn, R. (2012). Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments. II. Microscale behavior and its relation to the mesoscale. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **175**: 14-23. doi:10.1002/jpln.201100076.
- Markgraf W., Horn R., Peth S. (2006) An approach to rheometry in soil mechanics – Structural changes in bentonite, clayey and silty soils. *Soil and Tillage Research* **91**, 114.

- Markgraf, W., Horn R., Gragg, L.P., and J. M. Cassell (2009). Rheological Investigations in Soil Micro Mechanics: Measuring Stiffness Degradation and Structural Stability on a Particle Scale. *Progress in Management Engineering*. Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, USA. 237-279.
- Markgraf W., Watts C. W., Whalley W. R., Hrkac T., Horn R. (2012) Influence of organic matter on rheological properties of soil. *Appl. Clay Sci.* **64**, 25–33.
- Périte, P.; Holthusen, D.; Gubiani, P.I.; Reichert, J.M. (2018). Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities. *Scientia Agricola*.
- Reichert, J.M., Reinert, D.J., Suzuki, L.E.A.S., Horn, R. (2010). Mecânica do solo. Física Do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, pp. 298.
- Stoppe N., Horn R. (2018) Microstructural strength of tidal soils – a rheometric approach to develop pedotransfer functions. *J. Hydrol. Hydromech.* **66**, 87–96. doi: 10.1515/johh-2017-0031
- Teamrat A., Ghezzehei T. A., Or D. (2001) Rheological Properties of Wet Soils and Clays under Steady and Oscillatory Stresses. *Soil Science Society of America Journal* **65 (3)**, 624–637.
- World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. (2015) International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

УДК 631.86:631.445.24

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННОГО КУРИНОГО ПОМЕТА НА АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ

Царёва М.В.¹

¹ Учреждение образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, e-mail: tsarevamariya@mail.ru

INFLUENCE OF THERMALLY TREATED POULTRY MANURE ON AGROPHYSICAL
PROPERTIES OF SODDY-PODZOLIC LIGHT LOAMY SOIL

Tsareva M.V.

Belarussian State Agricultural Academy, the Republic of Belarus, e-mail:
tsarevamariya@mail.ru

Annotation: The use of thermally treated poultry manure in organic-mineral potato fertilization system (N20P70K120 + 1 t/ha organic fertilizer) allows to rich optimal values of physical and physical-chemical properties of soddy-podzolic light loamy soil.

Введение

Органические удобрения являются основой плодородия почв. Систематическое их применение улучшает физические свойства почвы, понижает кислотность, повышает содержание поглощённых оснований, поглощательную способность и буферность, создаёт оптимальные условия для минерального питания растений (Персикова, 2014). Птичий помет — полное быстродействующее удобрение. По действию на урожай куриный помет ближе к минеральным удобрениям, чем к навозу КРС. Но его действие более благоприятное по сравнению с минеральными удобрениями, так как часть азота здесь находится в органической форме и постоянно переходит в доступную для растений форму (Справочник агрохимика, 2021; Царёва, 2022). Проблема эффективного использования куриного помёта может быть успешно решена, если он будет перерабатываться на птицефабриках в новые виды побочной продукции. Сушка птичьего помёта является для сельскохозяйственных предприятий одним из способов производства органических удобрений из птичьего помёта. При термической сушке уничтожаются патогенные бактерии, яйца гельминтов и семена сорняков, масса сырого помёта уменьшается в 3-4 раза, а физические свойства сухого удобрения позволяют вносить его в почву практически всеми машинами, предназначенными для разбрасывания минеральных удобрений (Лысенко, 2015; Мерзлая, 2002, Седых и др, 2013).

Объекты и методы

Гранулированное органическое удобрение получено методом термической сушки из куриного помета в ООО «АгроСива» (патент на изобретение № 2803800) (Романова и др., 2023) имеет следующий химический состав: массовая доля влаги 24%, рНКСl 5,97, зольность 17%, массовая доля органического вещества (в пересчете на углерод) 41%, массовая доля общего азота (в пересчете на сухое вещество) 5,9%, массовая доля общего фосфора (в пересчете на сухое вещество) 5,5%, массовая доля общего калия (в пересчете на сухое вещество) 2,9%, содержание серы 9891,16 мг/кг, бора 23,76 мг/кг, цинка 560,6 мг/кг, марганца 830,3 мг/кг, железа 246,1 мг/кг, меди 787,5 мг/кг, селена 762,8 мг/кг (в пересчете на сухое вещество.).

С целью установления влияния термически обработанного куриного помёта, при органоминеральной системе удобрения картофеля, на агрофизические свойства дерново-подзолистой, средне-окультуренной, легкосуглинистой почвы, развивающейся на лессовидном суглинке, подстилаемой моренным суглинком с глубины 1,2 м. проведены исследования в 2021-2023 гг. в УНЦ «Опытные поля БГСХА».

Методы исследований: полевые опыты, лабораторные анализы, статистические методы

Годы проведения исследований отличались по метеорологическим условиям: ГТК 2021 – 1,3 (нормально увлажнённый), 2022 – 0,8 (засушливый), 2023 – 0,9 (засушливый). Предшественник – зерновые культуры. Сорт картофеля – Першацвет, ранний, столовый; имеет стойкий иммунитет ко многим вредителям и болезням, неприхотлив к погодным условиям отличается высокой урожайностью, вкусовые качества хорошие; эффективно использует естественное плодородие почв.

Результаты и обсуждение

Плотность почвы (объёмная масса), это очень динамичная и вместе с тем информативная величина. Она зависит от минералогического и гранулометрического состава, структуры, содержания органического вещества. Необходима для расчета запасов в почве воды, солей, гумуса, питательных элементов. Плотность сложения и плотность твердой фазы пахотного слоя почвы перед посадкой картофеля составляла 1,19 и 2,43 г/см³ соответственно (табл. 1). Все приемы окультуривания почвы, изменяя ее плотность сложения изменяют и величину ее пористости. Пористость или скважность почвы считают наиболее выразительным показателем ее плотности сложения, так как в поровом пространстве протекают все биологические, физические и химические процессы, определяющие уровень плодородия почвы. Как показали результаты исследований, общая пористость пахотного слоя почвы перед посадкой картофеля составляла 51 %, пористость аэрации – 11,7%.

Почвы, содержащие в поглощенном состоянии преимущественно катионы оснований (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ и др.), называются насыщенными основаниями. Общее количество поглощенных катионов оснований, способных к обмену на катионы почвенного раствора, называется суммой обменных оснований. Почвы, насыщенные основаниями, имеют прочную структуру, благоприятную реакцию среды. Сумма обменных оснований (S), перед посадкой картофеля, составляла 23,82 мг-экв/100 г почвы. Максимальное количество катионов, удерживаемое почвой в обменном состоянии, называется емкостью катионного обмена (ЕКО). Эта относительно стабильная величина для каждой почвы и является одной из важнейших ее характеристик. Для дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы она составила 24,06 мг-экв/100 г почвы, что подтверждает её высокую ёмкость поглощения. Свойства почвы характеризуются также степенью насыщенности основаниями (V%) – суммой поглощенных оснований, выраженной в процентах от емкости поглощения. Величина степени насыщенности основаниями – важный показатель для характеристики степени кислотности почвы, ее учитывают при определении, насколько нуждаются почвы в известковании. При высокой степени насыщенности почвы основаниями (80-90%), она не нуждается в известковании. Так как степень насыщенности основаниями равна 99%-почва не нуждается в известковании. Обменная кислотность почвы перед посадкой картофеля близкая к нейтральной (рНКСI – 6,37) (табл.1).

Таблица 1. Физико-химические и физические свойства дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы (среднее 2021-2023гг.)

Варианты опыта	рНкcl	Hg	S	ЕКО	V, %	dv	d	$P_{\text{общ.}} \%$	$P_{\text{аэр.}} \%$	$P_w \%$
		Мг-экв/100г почвы			%	г/см ³				
Перед посадкой картофеля										
Без удобрений	6,37	0,24	23,82	24,06	99	1,19	2,43	51,0	11,7	39,3
Перед уборкой картофеля										
N ₇₀ P ₇₀ K ₁₂₀	5,96	0,29	22,53	22,82	98	1,19	2,43	51,0	14,6	37,1
N ₂₀ P ₇₀ K ₁₂₀ +1т/га	5,96	0,29	17,84	18,13	98	1,09	2,44	64,6	28,3	31,8
ОУ вразброс										
N ₇₀ P ₇₀ K ₁₂₀ +1т/га	6,39	0,14	22,36	22,50	99	1,12	2,51	52,8	22,1	32,6
ОУ вразброс										

ОУ- органическое удобрение (термически обработанный куриный помёт)

Перед уборкой картофеля плотность сложения и плотность твердой фазы пахотного горизонта почвы, не зависимо от условий питания, была оптимальной и колебалась от 1,09 до 1,12 г/см³ и от 2,43 до 2,51 соответственно, общая пористость пахотного слоя почвы изменялась от 51 до 64,6%, пористость аэрации от 14,6 до 28,3%, сумма обменных оснований (S) колебалась от 17,84 до 22,53 мг-экв/100 г

почвы, емкостью катионного обмена ЕКО от 18,13 до 22,82 мг-экв/100 г, степень насыщенности основаниями (V%) от 98 до 99%. Большинство возделываемых культур, в том числе и картофель, и почвенных микроорганизмов лучше развивается при слабокислой или близкой к нейтральной реакции почвы. Обменная кислотность изменялась от слабокислой – 5,96 до близкой к нейтральной – 6,39 (табл.). Таким образом, при применении термически обработанного куриного помёта при органоминеральной системе удобрения картофеля, физические и физико-химические свойства дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы соответствуют её оптимальным значениям.

Выводы

Применение термически обработанного куриного помёта в составе органоминеральной системы удобрения картофеля (N20P70K120 + 1 т/га ОУ), позволяет достигнуть оптимальных значений физических и физико-химических свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы.

Литература

- Персикова, Т.Ф. Вильдфлуш И.Р., Лапа В.В. (2014) Применение удобрений и плодородие пахотных земель в Республике Беларусь. Совершенствование программы и методов агрохимических исследований: материалы VIII Симпозиума учёных и агроэкологов «Агрохимэкодружества» (Белгород, 25-27 июня 2013 г.). – М.: ВНИИА, 21-29.
- Справочник агрохимика (2021) В.В. Лапа [и др.]; Ин-т почвоведения и агрохимии; под ред. акад. В.В. Лапа. – Минск: ИВЦ Минфина, 260 с.
- Царёва М.В. (2022) Влияние доз и способов внесения термически высушенного куриного помёта на урожайность и качество картофеля. *Агрохимический вестник* **6**, 52-57.
- Лысенко В.П. (2015) Птичий помёт – отход или побочная продукция. *Птицеводство* **6**, 55.
- Мерзлая Г.Е., Лысенко В.П. (2022) Агроэкологические прогнозы использования птичьего помёта. *Агрохимический вестник* **6**, 23.
- Седых В.А., Савич В.И., Поветкина Н.Л. (2013) Оценка влияния птичьего помёта на состояние почв, воздушной и водной среды. *Агрохимический вестник* **1**, 33-36.
- Романова Н.Н., Царёва М.В., Персикова Т.Ф., Пугач И.В., Якубовский Д.В., Голубенко М.И. Способ получения гранулированного органического удобрения для повышения плодородия почвы при возделывании сельскохозяйственных культур: Патент на изобретение RU 2803800 С1, 19.09.2023. Заявка № 2022128895 от 07.11.2022.

УДК: 631.4

СТАТИСТИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА СЕДИМЕНТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ (ISR+) С МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ

Шейн Е.В.¹, Дембовецкий А.В.¹, Тюгай З.Н.¹, Женис Жансая¹

¹ Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
Evgeny.shein@gmail.com

Shein E.V., Dembovetsky A.V., Tyugai Z, Zhenis Zhansaya

¹ Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

² Federal Research Centre «V.V. Dokuchaev Soil Science Institute»

³ Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Scientific Center

e-mail: evgeny.shein@gmail.com

Annotation. Sedimentometric and laser diffractometry methods have different physical bases, instrumentation and calculation procedures. The final results on the granulometric composition of soils by these soils also differ. However, until now, only differences of clay components have been indicated, which was associated with a difference in partial density of the solid phase of physical clay particles. In this study, a statistical comparison was made by the Williams-Klute method of the parameters of the distribution of clay components according to Berezin (1983) obtained using a laser diffractometer and a sedimentometric method on a Pario device. For sandy loam sod-podzolic soil (Tver region, VNIIMZ Test site), a highly significant (less than 0.05) reliability of differences in the distribution parameters of clay components by these methods with the same pretreatment procedure has been statistically proven.

Введение

До настоящего времени эти массовые распределения содержания элементарных почвенных частиц (ЭПЧ) по размерам получают различными методами, среди которых наиболее распространены методы седиментометрии, основанные на использовании закона Стокса (Качинский, 1965; Вадюнина, Корчагина, 1976 и др.) в вариантах пипет-метода, метода ареометра и методами с использованием различных приборных средств в виде седиграфов (Березин, Воронин 1981) и седиментометрических анализаторов размера частиц в растворе PARIO PLUS (Durner et al, 2016, Руководство по эксплуатации измерительной системы почвенных частиц PARIO). Лазерные дифрактометры имеют в теоретической основе совсем иные физические принципы и расчётные уравнения (Eshel et al, 2004). Этот метод основан на законе разделения лазерных лучей,

которые, попадая на почвенные частицы разного размера, рассеиваются под разными углами в соответствии с кривизной их поверхности, т.е. с их размерами. Возникающую на матрице прибора дифракционную картину используют для расчета распределения частиц по размеру на основе решения обратной задачи, предложенного немецким физиком Густавом Ми.

Указанные методы определения гранулометрического состава глинистых связных почв, дисперсных грунтов и почвенного мелкозема не дают однозначно равные данные по гран составу даже при одинаковой подготовке почв к гранулометрическому анализу, что связано с разнообразием форм частиц, отличных от сферической, содержанием органического вещества, плотностью твердой фазы тонких фракций и пр. (Качинский, 1970; Вадюнина, Корчагина, 1986), которая допускается для всех фракций ЭПЧ одинаковой и постоянной. Эксперименты по определению гранулометрического состава традиционными седиментометрическими методами (пипетки, ареометра и др.) в сравнении с методами лазерной дифракции показывают, что, как правило, методы лазерной дифракции дают более низкие результаты по содержанию физической глины и особенно, тонких фракций, ила в тяжелосуглинистых, богатых органическим веществом почвах (Юдина, 2018, 2020; Федотов и др, 2007).

Вопрос о расхождении результатов гранулометрического анализа этими двумя методами регулярно возникает не только на научных конференциях, защитах научных работ, но и в практике почвоведения. Как правило, ограничиваются качественным сравнением диаграмм фракций, реже – дифференциальными или интегральными кривыми гранулометрического состава, указанными двумя методами. Авторы, как правило, по этому качественному сравнению указывают, что пипет-метод дает более высокие результаты, чем дифрактометрический за счет того, что тонкие фракции гранулометрических элементов содержат органические вещества и другие компоненты, плотность которых ниже, чем используемая в расчетах усредненная плотность твердой фазы для исследуемого образца. В этом случае расчетное время отбора пробы (как седиграфом, так и пипеткой) увеличивается и в пробу попадают некоторое количество дополнительных частиц, имеющих меньшие значения плотности фазы. Как правило, это ЭПЧ органического состава. Поэтому и различия в указанных двух методах касаются прежде всего тяжелых почв с высоким содержанием органических веществ. Например, черноземов, пойменных почв и т.д. (Юдина, 2018, 2020; Федотов и др, 2007). Отметим, что статистическое сравнение лазерного метода, дающего непрерывные кривые распределения ЭРЧ, с пипет-методом, позволяющим определить в диапазоне глинистых компонентов (частиц <0.005 мм) лишь четыре экспериментальные значения (секундная, минутная, часовая и суточная пробы) Это ограничение по количеству дат не позволяет применить статистические методы для сравнения указанных методик, поэтому сравнение производят лишь визуально, качественно.

Мы попытались выяснить наличие различий с привлечением классических методов математической статистики.

Объекты и методы

Исследовался гранулометрический состав супесчаной агроподзолистой почвы на двучленных отложениях (Тверская область, Опытный полигон ВНИИМЗ), которая во многих отношениях может являться центральным образом для почв российского Нечерноземья (Иванов и др, 2021). Гранулометрический состав прежде всего пахотного горизонта изучали с помощью метода лазерной дифрактометрии (Mastersizer 3000), дающего 14 точек в области глинных компонентов (частиц менее 0.005 мм), и методом ISP+ на приборе Pario, который тоже позволяет в этой области получать более 20 дат. Именно поэтому сравнение проводилось по существенным выборкам, но только для глинных компонентов супесчаной дерново-подзолистой почвы.

Прежде всего следует напомнить, что мы имеем дело с распределением содержания частиц разного размера. И сравнение следует проводить не просто по содержанию отдельных фракций, а для распределения, т.е. с использованием некоторой функциональной зависимости. К сожалению, плавных и неразрывных функций для всего диапазона ЭПЧ предложено немного. А те, которые предложены, имеют большое количество параметров, что значительно затрудняет сравнение. Поэтому мы ограничились сравнением результатов двух методов основной части всей всего распределения, а именно областью «глинных компонентов – частиц диаметром менее 0.005 мм. Для этого диапазона частиц П.Н. Березиным предложено довольно простое уравнение $y = k \log(x)$, где x – диаметр ЭПЧ для указанного диапазона, y – соответствующее их % содержание, а k – коэффициент, названный П.Н. Березиным «дисперсностью» глинных компонентов. Березин (1983) использовал это уравнение для описания функции распределения глинных компонентов интегральный вид распределения. Мы также использовали для сравнения методов лазерной дифрактометрии с седиментационным именно этот вид распределения глинных компонентов.

Для сравнения указанных двух распределений глинных компонентов по их параметрам k_1 и k_2 используем общеизвестную статистическую формулу для сравнения параметров двух одинаково записанных функций по t -критерию:

$$t = \frac{|k_1 - k_2|}{\sqrt{(S_1)^2 + (S_2)^2}},$$

где k_1 и k_2 - параметры распределения содержания глинных компонентов методом лазерной дифракции и прибором PARIO, S_1 и S_2 - соответствующие средние квадратичные ошибки. Считается, что если рассчитанный t -критерий более

табличного для соответствующего количества дат, то сравниваемые зависимости различаются при указанном уровне вероятности (Пачепский, 1992).

Результаты и обсуждение

Были построены графики распределения частиц в диапазоне 1-5 мкм (область глинных компонентов по Березину П.Н.) в полулогарифмической шкале по x (диаметр частиц) для данных, полученных на лазерном дифрактометре и Pario) (Рис. 1). Полученные данные аппроксимировались линейной функцией и достоверно описывают экспериментальные значения с уровнем значимости < 0.05 . Затем проводили сравнение полученных параметров аппроксимации в программе Statistika по t -критерию. Полученные данные показали достоверность различий параметров аппроксимации для всех слоев. Наибольшие расхождения наблюдались в области частиц < 1 мкм и напротив в области 4-5 мкм данные имели близкое схождение.

Сравнение результатов, полученных методов лазерной дифрактометрии и седиментационного метода на приборе Pario в изображении глинных компонентов по Березину (1982) показало (рис1), что для исследованной почвы с содержанием физической глины 20-30% возможны отличия в результатах, полученных указанными методами. Эти различия, как показывают расчеты, достоверны и могут быть обусловлены различием в плотности твердой фазы пылеватой компоненты гранулометрического состава, на содержание которой очень чувствительно реагирует прибор PARIO. Это особенно важно при использовании данных по гранулометрическому анализу для получения педотрансферных функций, в особенности для использования указанных функций при гидрологических расчетах и прогнозах.

Следует отметить, что, видимо, не следует искать стабильных достоверных различий между лазерным методом и методом седиментации вследствие существенных различий плотности твердой фазы в различных почвах. На этот факт указывал А.Д. Воронин, который подчеркивал «В почвах, сформированных на других породах, минералогический состав ЭПЧ и закономерности распределения содержания в зависимости от размера частиц могут изменяться» (Воронин, 1986, стр.55). Соответственно, может изменяться и плотность твердой фазы ЭПЧ, её распределения и итоговый результат в виде распределения содержания ЭПЧ по размерам, т.е. гранулометрический состав.

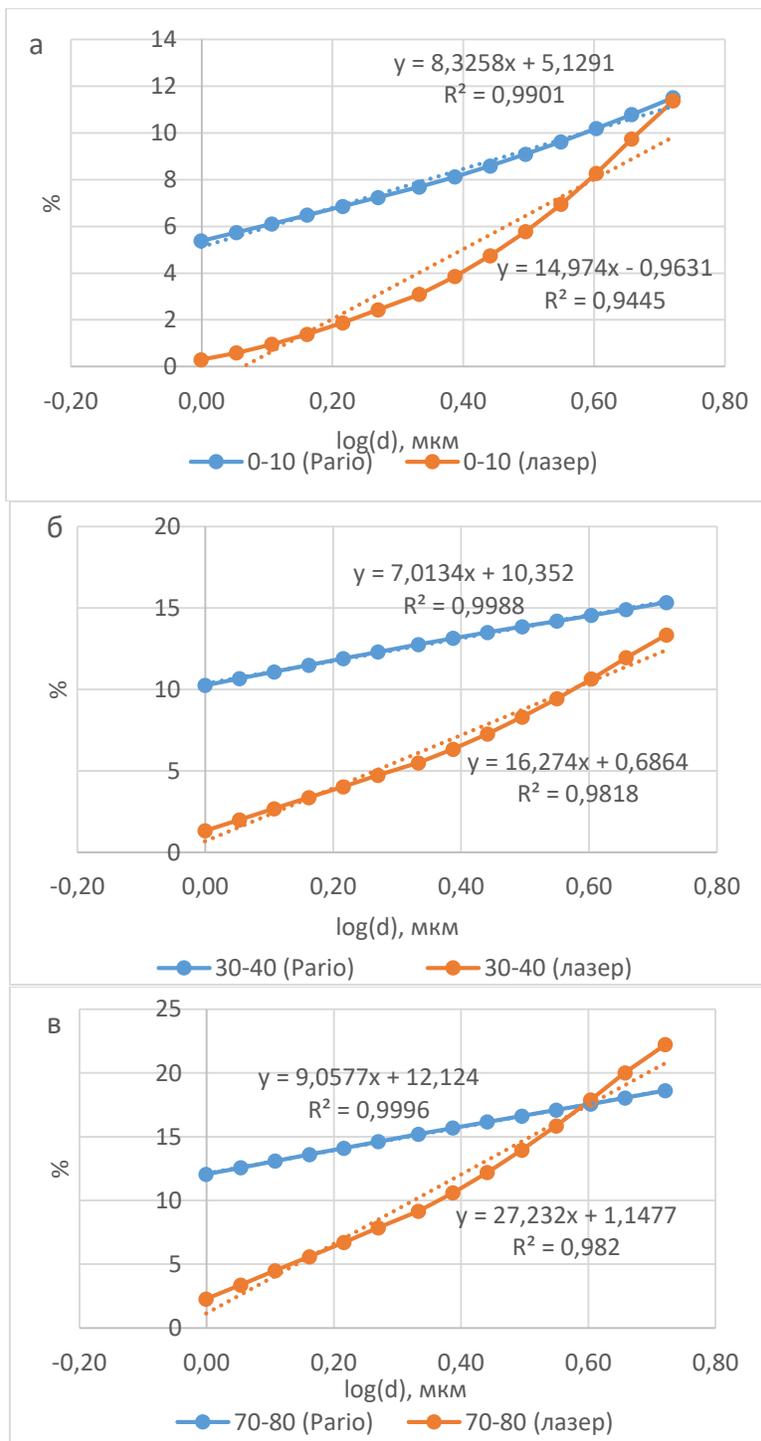


Рис. 1. Гранулометрическое распределение глинных компонентов агродерновой почвы (частицы в диапазоне 1-5 мкм, по Березину, 1983): а – 0-10 см, б – 30-40 см, в – 70-80 см

Выводы

Для легких агродерново-подзолистых почв (0-40 см) кривые гранулометрического состава в диапазоне 1-50 мкм для методов лазерной дифракции и седиментометрического метода в приборном оснащении Ratio достоверно с вероятностью 0.95 различаются.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800146-3 «Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления»).

Литература

Березин П.Н. (1983) Особенности распределения гранулометрических элементов почв и почвообразующих пород. *Почвоведение* 2, 64–72

Вадюнина А.Ф., З.А. Корчагина (1986) Методы исследования физических свойств почв. М.Агропромиздат, 416 с.

Воронин А.Д. (1986) Основы физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 244 с.

Иванов Д.А. и др. (2021) Разработать теоретические основы ландшафтно-мелиоративного природообустройства агрогеосистем гумидной зоны на основе результатов мониторинга состояния их природной среды и дистанционного зондирования Земли. Тема 0651-2019-0005 (руководитель темы: Иванов Д.А.). Отчет о научно-исследовательской работе ФГБНУ ВНИИМЗ.

Качинский Н. А. (1965) Физика почвы Ч.1.М., 319 с.

Пачепский Я.А. (1992) Математические модели процессов мелиорируемых почвах. Изд-вл Моск.ун-та, 85 с.

Руководство по эксплуатации измерительной системы почвенных частиц PARIO
https://library.metergroup.com/Manuals/20780_PARIO_Manual_Web.pdf

Федотов Г.Н., Шеин В.Е., Путляев В.И., Архангельская Т.А., Елисеев А.В., Милановский Е.Ю. (2007) Физико-химические основы различий седиментометрического и лазерно-дифракционного методов определения гранулометрического состава почв // *Почвоведение* 3, 310-317.

Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д. и др. (2017) Практикум по твердой фазе почв. Учебное пособие. М.: «Буки-Веди», 119 с.

Шеин Е.В., Иванов Д.А., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В. (2022) Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района

(Восточно-Европейская равнина, Тверская область). *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева* **110**, 5-21. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-5-21.

Юдина А.В., Фомин Д.С., Валдес-Коровкина И.А., Чурилина Н.А., Александрова М.С., Головлева Ю.А., Филиппов Р.В., Ковда И.В., А. А. Дымов А.А., Е. Ю. Милановский Е.Ю. (2020) Пути создания классификации почв по гранулометрическому составу на основе метода лазерной дифракции. *Почвоведение* **11**, 1353–1371.

Durner, Wolfgang, Sascha C. Iden, and Georg von Unold. (2016). The Integral Suspension Pressure Method (ISP) for Precise Particle-Size Analysis by Gravitational Sedimentation. *Water Resources Research* **53** (1): 33–48. URL <https://doi.org/10.1002/2016WR019830> (open access).

Eshel G.G., Levy J., Mingelgrin U., Singer M.J. (2004) Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. *Soil Sci. Soc Am. J.* **68**, 736–743.

USDA 1996. *Soil Survey laboratory/ Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No 42. Version 3.0, 693 p.

УДК 631.40

ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ КАДАСТРОВОЙ СТОИМОСТИ ЧЕРНОЗЕМОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РОССИИ

Шехтер К.П., Сапожников П.М.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

k.shehter@mail.com

sap-petr@yandex.ru

Shekhter K.P., Sapozhnikov P.M.

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: The research demonstrates the influence of agroclimatic parameters and factors determining soil fertility on the cadastral value of various types of chernozems in the Central chernozem zone of Russia. The median cadastral value for southern chernozems is 5,7 rub/m², for ordinary chernozems it is 7,5 rub/m², for typical chernozems and leached chernozems – 18,9 rub/m² and the median for podzolized chernozems is 20,9 rub/m².

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется государственной кадастровой оценке земель сельскохозяйственного назначения, поскольку именно эти земли имеют приоритет по сравнению с другими категориями земель для обеспечения продовольственной безопасности страны, отличаются социально-экономической важностью и являются незаменимым средством производства в сельском хозяйстве. Кроме того, всесторонняя оценка качества почвы сельскохозяйственных угодий необходима для рационального сельскохозяйственного производства и экологической защиты почв. Правовой режим земель сельскохозяйственного назначения имеет отличительные особенности, среди которых выделяют обеспечение почвенного плодородия, предотвращение сокращения их площадей и защиту земель от негативных внешних воздействий. Государственная кадастровая оценка земель является неотъемлемой процедурой для успешного функционирования системы земельных отношений нашей страны. Результаты кадастровой оценки земель необходима и для определения арендной платы и налога, который впоследствии формирует бюджет субъектов.

Центральная черноземная зона России обладает большим потенциалом сельскохозяйственного производства. Важное агроэкономическое значение имеют Воронежская, Белгородская, Липецкая, Курская, Тамбовская и Орловская области. В структуре земельного фонда преобладают земли сельскохозяйственного назначения, наибольшая часть приходится на Воронежскую область (4175,1 тыс.га), доля земель сельскохозяйственного назначения в субъекте составляет 80%. Доля

земель сельскохозяйственного назначения в Белгородской области равна 76,8%, в Курской области - 75,7%, доля земель сельскохозяйственного назначения Липецкой области равна 79,7%, Тамбовской области – 80,7%, а Орловской – 82,5% (Минприроды России, 2023).

В почвенном фонде Белгородской, Липецкой и Орловской областей преобладают черноземы выщелоченные - 36%, 57,3% и 39% соответственно. В Курской области наибольшая доля почвенного фонда приходится на типичные черноземы - 26,1%, доля выщелоченных черноземов при этом составляет 20,8%. В Тамбовской области также наибольшая доля почвенного фонда соответствует типичным черноземам – 22,9%. Для Воронежской области характерно преобладание черноземов обыкновенных (31 %), доля черноземов типичных составляет 16,9%, черноземов выщелоченных – 12,8%, черноземов оподзоленных – 3,3%, южные черноземы составляют менее 5% почвенного фонда (Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, 2014).

Территории исследуемых агроландшафтов Центральной черноземной зоны характеризуется умеренно-континентальным климатом. Максимальный показатель агроклиматического потенциала соответствует первой подзоне Курской области (8,1), показатель снижается до 7,7 во второй подзоне. Агроклиматический потенциал Белгородской области изменяется от 7 до 7,8, Орловской области – от 7,5 до 7,9, агроклиматический потенциал Липецкой области равен 7,2. В Воронежской области величина агроклиматического потенциала варьирует от 6,5 для пятой агроклиматической подзоны до 7,5 для первой. Наименьшее значение соответствует пятой агроклиматической подзоне Воронежской области – 6,7 (Носов, 2010).

Целью данного исследования является определение влияния агроклиматических условий, негативных факторов на формирование удельных показателей кадастровой стоимости различных типов черноземов.

Объекты и методы

Объектами исследования являются черноземы агроландшафтов Европейской части России в границах Белгородской, Воронежской, Курской, Липецкой, Тамбовской и Орловской областей.

Методы исследования включают работу со шкалами ВИСХАГИ (областные списки почв), расчет удельных показателей кадастровой стоимости (УПКС) в соответствии с методическими указаниями о государственной кадастровой оценке земель сельскохозяйственного назначения (Росреестр, 2021) и техническими указаниями (Сапожников, Носов, 2012), а также использование специального программным обеспечения (Пшеничников и др., 2019).

С помощью программного обеспечения получают показатели нормативной урожайности и удельные показатели кадастровой стоимости выделенных почвенных разностей.

Нормативная урожайность, определяемая расчетным путем, является необходимым показателем для определения кадастровой стоимости почв агроландшафтов, а также позволяет оценить и классифицировать пригодность земель сельскохозяйственного назначения (ГОСТ Р 70229-2022). Основными сельскохозяйственными культурами возможными к выращиванию на исследуемых территориях являются зерновые, картофель, сахарная свекла, подсолнечник, однолетние и многолетние травы. При расчете учитывается агроклиматический потенциал подзоны, зависящий от климатических условий, в первую очередь от коэффициента увлажнения и суммы активных температур.

При расчете кадастровой стоимости также определяют рыночную стоимость культур, затраты на их возделывание и затраты на поддержание плодородия.

Результаты и обсуждение

Для Центральной черноземной зоны характерны высокие показатели нормативной урожайности сельскохозяйственных культур. Для черноземов оподзоленных, черноземов выщелоченных и черноземов типичных максимальные значения нормативной урожайности зерновых достигают 40,2 – 41,9 ц/га, максимум для обыкновенных черноземов равен 35,9 ц/га, а для южных черноземов 31,9 ц/га (рис. 1). Однако нормативная урожайность в Центральной черноземной зоне остается ниже, чем для черноземов юга России (Ростовская область, Краснодарский край, Ставропольский край), где максимум нормативной урожайности южных черноземов достигает 40,7 ц/га, черноземов обыкновенных – 46,6 ц/га, черноземов типичных – 54 ц/га, черноземов выщелоченных – 50,8 ц/га (Сапожников, Шехтер, 2021; Шехтер, Сапожников, 2022).



Рис. 1. Максимальные показатели нормативной урожайности зерновых в Центральной черноземной зоне по почвам, ц/га

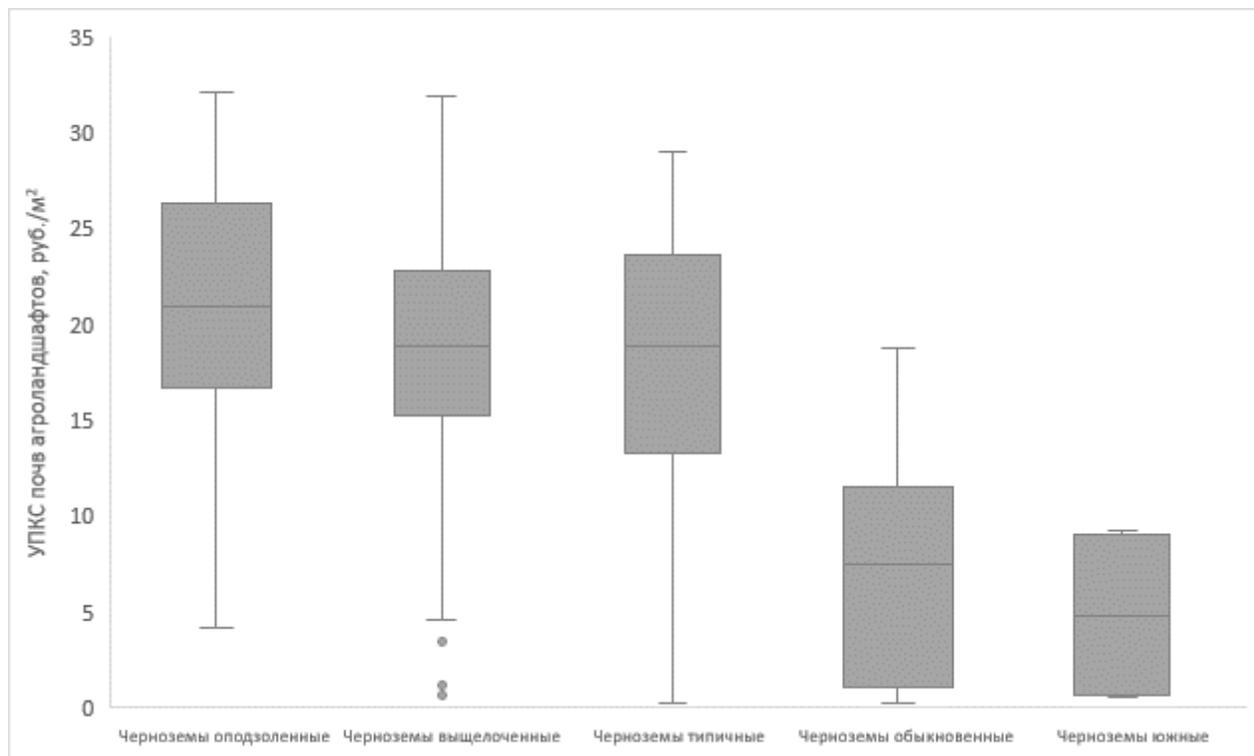


Рис. 2. Ранжирование УПКС различных типов черноземов по субъектам Европейской части России, руб./м²

Таблица 1. Статистические характеристики удельных показателей кадастровой стоимости черноземов агроландшафтов Центральной черноземной зоны, руб./м²

Почва	Минимум	Нижний квартиль	Медиана	Верхний квартиль	Максимум
Черноземы оподзоленные	4,2	16,7	20,9	26,3	32,1
Черноземы выщелоченные	0,3	15,2	18,9	22,8	31,9
Черноземы типичные	0,2	13,3	18,9	23,6	29,0
Черноземы обыкновенные	0,2	1	7,5	11,5	18,8
Черноземы южные	0,5	0,6	5,7	9,1	9,3

Удельные показатели кадастровой стоимости черноземов оподзоленных изменяются в диапазоне от 4,2 руб./м² для почвы, расположенной в Липецкой области в подзоне с агроклиматическим потенциалом 7,2, до 32 руб./м² для

чернозема оподзоленного Курской области (агроклиматический потенциал 7,7) (таблица 1). Черноземам оподзоленным соответствует медианное значение равное 20,9 руб./м² (рис.2).

Дифференциация кадастровой стоимости обусловлена различиями в содержании гумуса, при этом для черноземов оподзоленных слабо смытых удельные показатели снижаются до 8,8 руб./м² (Воронежская область). В таблице 2 показана дифференциация удельных показателей кадастровой стоимости черноземов под влиянием негативных свойств.

Таблица 2. Влияние негативных признаков на кадастровую стоимость черноземов, руб./м²

Почва	Медианные значения УПКС черноземов руб./м ²	УПКС под влиянием негативного признака руб./м ²	Признак
Черноземы оподзоленные	20,9	8,8	слабо смытые
Черноземы выщелоченные	18,9	3,4	среднесмытые
Черноземы выщелоченные	18,9	1,3	сильносмытые
Черноземы выщелоченные	18,9	0,3	сильносолонцеватые
Черноземы типичные	18,9	17,8	слабо смытые
Черноземы типичные	18,9	0,2	сильно смытые
Черноземы типичные	18,9	9,1	среднесолонцеватые
Черноземы типичные	18,9	1,4	сильносолонцеватые
Черноземы обыкновенные	7,5	0,2	слабо смытые среднесолонцеватые
Черноземы обыкновенные	7,5	0,3	среднесолонцеватые
Черноземы южные	5,8	1,1	средне смытые
Черноземы южные	5,8	0,5	среднесолонцеватые

Минимальные удельные показатели кадастровой стоимости выщелоченных черноземов соответствуют сильносолонцеватым почвам, обнаруженным в четвертой

агроклиматической подзоне Воронежской области (0,3 руб./м²). Для чернозема выщелоченного без негативных признаков удельные показатели возрастают до 31,9 руб./м². Дифференциация обусловлена тем, что почвы с сильными признаками осолонцевания более не пригодны под выращивание высокодоходных сельскохозяйственных культур. Схожая тенденция отмечена при увеличении степени смывости. Удельные показатели черноземов выщелоченных средне смывтых Орловской области снижаются до 3,4 руб./м², сильно смывтых – до 1,3 руб./м². Медианное значение удельных показателей кадастровой стоимости выщелоченных черноземов составляет 18,9 руб./м².

Медианные значения кадастровой стоимости черноземов типичных схожи с черноземами оподзоленными и черноземами выщелоченными (18,9 руб./м²). Удельные показатели лежат в диапазоне от 0,2 руб./м² для сильно смывтых почв до 29 руб./м² для почвы без негативных признаков. Удельные показатели черноземов типичных слабо смывтых Тамбовской области составляют 17,8 руб./м². Для среднесолонцеватой почвы кадастровая стоимость снижается до 9,1 руб./м², а при сильном осолонцевании - до 1,4 руб./м². С увеличением агроклиматического потенциала подзоны до 7,8 для почв без негативных признаков удельные показатели типичных черноземов увеличиваются до 20 руб./м².

Удельные показатели кадастровой стоимости обыкновенных черноземов варьируют от 0,2 руб./м² до 18,8 руб./м². Максимальные значения кадастровой стоимости соответствуют чернозему обыкновенному без негативных признаков с наибольшим содержанием гумуса, мощностью гумусового горизонта, а также при наибольшем агроклиматическом потенциале.

Наиболее низкое медианное значение удельных показателей кадастровой стоимости соответствует южным черноземам – 5,8 руб./м². Почвы соответствуют пятой агроклиматической подзоне Воронежской области с наименьшим значением агроклиматического потенциала для исследуемой зоны (6,7). При влиянии такого негативного фактора как осолонцевание, удельные показатели кадастровой стоимости снижаются до 0,5 руб./м². Схожая тенденция была отмечена для черноземов южных Ростовской области (Сапожников, Шехтер, 2021). При увеличении степени смывости показатели соответствуют 1,1 руб./м².

Выводы

Для агроландшафтов Центральной черноземной зоны России определены медианные значения удельных показателей кадастровой стоимости черноземов. Наиболее низкое значение соответствует южным черноземам – 5,7 руб./м², медианна обыкновенных черноземов равна 7,5 руб./м², черноземов типичных и черноземов выщелоченных – 18,9 руб./м², отмечена тенденция к увеличению медианного значения удельных показателей кадастровой стоимости черноземов оподзоленных

(20,9 руб./м²). Дифференциация удельных показателей обусловлена свойствами почв, влиянием негативных признаков и разницей агроклиматических потенциалов.

Увеличение агроклиматического потенциала (возрастание суммы активных температур больше десяти градусов, возрастание коэффициента увлажнения) приводит к увеличению кадастровой стоимости. Так удельные показатели кадастровой стоимости одинаковых подтипов черноземов без негативных признаков возрастают при увеличении агроклиматического потенциала. А наиболее низкие медианные значения отмечены для южных черноземов, которые соответствуют пятой агроклиматической подзоне Воронежской области с наименьшим значением агроклиматического потенциала для исследуемой зоны (6,7).

Отмечено, что влияние таких негативных факторов как осолонцевание и степень смытости значительно снижают кадастровую стоимость черноземов агроландшафтов. При осолонцевании снижение превышает 98%. Кадастровая стоимость слабо смытых почв уменьшается на 6-58%, а сильно смытых на 93-98%. Значительное увеличение степени смытости (а также уклона рельефа местности) сокращает нормативную урожайность сельскохозяйственных культур на агроландшафтах и удельные показатели кадастровой стоимости.

Благодарность

Работа выполнена по теме государственного задания: «Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления», номер ЦИТИС: 121040800146-3.

Литература

- ГОСТ Р 70229—2022. (2020) Показатели качества почв для проведения мониторинга и кадастровой оценки земель, используемых в сельскохозяйственном производстве – М.: Москва Стандартинформ, 32с.
- Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография. (2014) М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 768 с.
- Методические указания о государственной кадастровой оценке. Приказ № П/0336 «Об утверждении Методических указаний о государственной кадастровой оценке» (от 17 декабря 2021 года)
- О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В.Ломоносова, 2023. – 686 с.
- Пшеничников А.П., Носов С.И., Оглезнев А.К., Сапожников П.М. (2019) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2019611028. Кадастровая оценка земель сельскохозяйственного назначения.

- Сапожников П.М., Шехтер К.П. (2021) Кадастровая стоимость почв земель сельскохозяйственного назначения Ростовской области. *Научный журнал «Живые и биокосные системы»* **35**.
- Справочник агроклиматического оценочного зонирования субъектов Российской Федерации (2010) Учебно-практическое пособие под ред. С.И. Носова. М.: Изд-во, «Маросейка», 208 с.
- Шехтер К. П., Сапожников П. М. (2022) Кадастровая стоимость земель агроландшафтов Краснодарского края. *Использование и охрана природных ресурсов в России* **2**, 13.
- Шехтер К. П., Сапожников П. М. (2022) Кадастровая стоимость земель агроландшафтов Ставропольского края. *Эволюция и деградация почвенного покрова*. — Общество с ограниченной ответственностью СЕКВОЙЯ. Ставрополь: 250–254.

УДК 631.6+631.43

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СОЛЕЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УПЛОТНЕННЫХ ПОЧВ ПОД ВЛИЯНИЕМ РЫХЛЕНИЯ С ОБРАБОТКИ БИОСОЛВЕНТОМ

Широкова Ю.И.¹, Кодиров Д.Т., Палуашова Г.К., Садиев Ф.Ф.

¹ НИИ ирригации и водных проблем, г.Ташкент. Узбекистан
yulia_bonn@rambler.ru

The effectiveness of salt leaching when changing the physico-chemical properties of compacted soils under the influence of loosening from biosolvent treatment

Shirokova YU.I., Kodirov D.T., Paluashova G.K., Sadiev F.F
Research Institute of Irrigation and Water Problems, Tashkent. Uzbekistan

Annotation: Based on experimental data, unfavorable water-physical properties of saline soils of the experimental site in the Mirzaabad district of the Syrdarya region of Uzbekistan were established. At high soil density (up to 1.78 g/cm³), water infiltration into the soil was very low (<0.003 mm/min), and the degree of soil salinization in the 0-70 cm layer was up to 12 dS/m. Under these conditions, the following was carried out: deep loosening of the soil and leaching along the furrows. To improve the leaching of salts from the 0-70 cm layer, the chemical preparation Biosolvent was used, containing organic polymaleic acid, an analogue of the foreign preparation Spersal. Processing data based on the results of the experiment made it possible to establish quantitative indicators of the effectiveness of soil loosening and the use of Biosolvent.

Введение

Засоление почвы является фактором, снижающим продуктивность орошаемых земель. Помимо таких факторов, ограничивающих восстановление засоленных деградированных почв, как высокая степень засоления, близкое залегание грунтовых вод, выход из строя полевого дренажа, важное место занимают водно-физические свойства почв, лимитирующие солеотдачу почв. Вопрос выщелачивания солей из почв со сложными физико-химическими свойствами остаётся открытым. В 70-е годы XX века, при освоении Голодной степи проведено множество исследований, направленных на улучшение водно-физических свойств почв, подлежащих промывке. Однако, в некоторых случаях [4], при глубоком рыхлении почвы, при больших подачах воды на промывку, уплотнение почвы восстанавливалось от весны к осени. В научной литературе очень редко встречается исследование влияние инфильтрация воды в почву на эффективность промывки. Вероятно, что этот вопрос специально не изучался. В исследованиях по промывке и полученных формулах, инфильтрация учитывается косвенно, через интегральные коэффициенты выщелачивания солей: показатель солеотдачи u [1] и коэффициенты промывного действия воды по хлору u [5]. В зарубежных источниках по регулированию солевого режима почвы [10], указывается важность параметров

инфильтрации воды для выщелачивания солей, однако оптимальных количественных показателей не указано.

Основные аспекты рассоления почв, связанные с особенностями водно-физических свойств и выщелачиванием солей в данной зоне, были отмечены в некоторых исследованиях [3]. Цитируя О.К. Камилова (1982, 1985), [4] отмечает, что «Высокое засоление, наличие гипсоносных горизонтов, слоистое литологическое строение с преобладанием тяжелых суглинков и глин в разнообразных сочетаниях, определяют сложность почвенно-мелиоративных условий этой территории, это обуславливает малую эффективность промывных поливов и других мелиоративных мероприятий, следствием чего является изреженность и угнетенность растений и низкая их урожайность. Здесь необходима иная система агро-мелиоративных мероприятий, в основу которых должно лечь глубокое изучение генетических особенностей, химических и физических свойств почв и правильная оценка их мелиоративных качеств, что позволит наметить пути их рационального сельскохозяйственного использования».

Вышеуказанные неблагоприятные свойства почв создают очень низкую их солеотдачу при промывках. В данном контексте, инфильтрация воды в почву (водопроницаемость), является интегральным показателем всех неблагоприятных свойств почвы (генезис, мехсостав, плотность, упаковка частиц, включения (гипс, карбонаты) и химический состав солей), и именно она определяет успех или неудачу промывки почвы от солей, стратегию мелиорации и использования земель.

Наличие карбонатов кальция может являться препятствием для эффективного рассоления почв данного региона. По сведениям [2] CaCO_3 до 25% карбонаты могут осаждаться в крупных порах, снижая водопроницаемость почв. «Однако даже небольшое содержание дисперсных карбонатов в почвах (>2-4%) ведет к образованию плотной корки после поливов, которая может быть непроницаемой для воды и препятствовать росту растений (Soil Survey ..., 1979)».

Предшествующими исследованиями в данном регионе [9] и авторами данной статьи [9] изучена эффективность глубокого рыхления почвы для улучшения водно-физических свойств и процессов рассоления почв. Кроме того, авторами экспериментально установлено, что для усиления выщелачивания солей трудномелиорируемых гипсированных почв высокой степени засоления при промывке, целесообразно использовать препарат Биосолвент для обработки поверхности чеков перед заливкой воды [8].

Последующими исследованиями по рассолению трудномелиорируемых гипсированных почв проверена возможность усиления эффективности промывки засоленных земель при сочетании глубокого рыхления почвы и препарата Биосолвент при промывке по чекам и опреснения почв атмосферными осадками [11].

Целью исследования являлась оценка эффективности промывки по бороздам при малых затратах воды, при применении рыхления почв, а также препарата

Биосолвента. Промывка по бороздам не является абсолютно новой технологией. Многие фермеры проводят промывку по бороздам, совмещая её с влагозарядкой. В данном исследовании была проверена возможность использовать промывку по бороздам, как альтернативу промывке по чекам, при невысокой степени засоления, ограниченном количестве воды и отсутствия дренажа.

Объекты и методы

Опыт по промывке засоленных почв по бороздам, проведен в 2023 г. на исходно уплотненных почвах Мирзабадского района. Почвы по мехсоставу среднесуглинистые в слое 0-20 см, 20 - 124 см - легкосуглинистые, ниже - супесчаные. В верхнем полуметре, плотность равна 1,78 г/см³, а ниже 1,47- 1,57 г/см³. Почва засолена: в слое 0-30 см от 4,0 – 6,0 dS/m и в слое 30-70 см от 5,0-14,3 dS/m. Содержание карбонатов кальция и магния равномерно по всему профилю почвы и составляет 16,5-19,4 % к массе, из них 82-85 % карбонатов представлены карбонатом кальция [1]. Очевидно, вследствие этого, почва имеет очень низкую инфильтрацию воды в почву (<0,003 мм/мин). На части опытного участка ранее было проведено рыхление почвы на глубину 70 см.

Варианты опыта промывки по бороздам:

1. К-Контроль - на не рыхленной почве;
2. КБ-На не рыхленной почве, с опрыскиванием борозд Биосолвентом перед подачей воды (10 % раствор, 5 л препарата на 1 га);
3. Р-На предварительно рыхлёной почве на глубину 70 см;
4. РБ-На рыхленной почве, с опрыскиванием борозд Биосолвентом перед подачей воды (10 % раствор, 5 л препарата на 1 га);

Для усиления эффекта промывки по бороздам в вариантах опыта, кроме глубокого рыхления (70 см), применяли опрыскивание почвы перед заливкой воды 10 % раствором химического препарата Биосолвент местного производства, содержащего безвредную полималеиновую кислоту. Промывка проводилась по тупым бороздам длиной 100 м, при форсированной подаче воды в борозду расходом 1 – 2 л/с. Оценка рассоления почвы, проводилась сопоставлением данных до и после промывки в горизонтах 0-30 и 30-70 см, по данным измерения ЕС1:1 (в суспензии вода: почва 1:1 с пересчетом ЕСе), в образцах из всех точек наблюдения (рис.1). Кроме того, в образцах из точек, расположенных по створу, выполнены анализы полной водной вытяжки, с определением показателей: рН; ЕСе, плотный остаток, содержание растворимых ионов НСО³; Cl⁻; SO⁴; Ca^{..}; Mg^{..}; Na['] и K['].

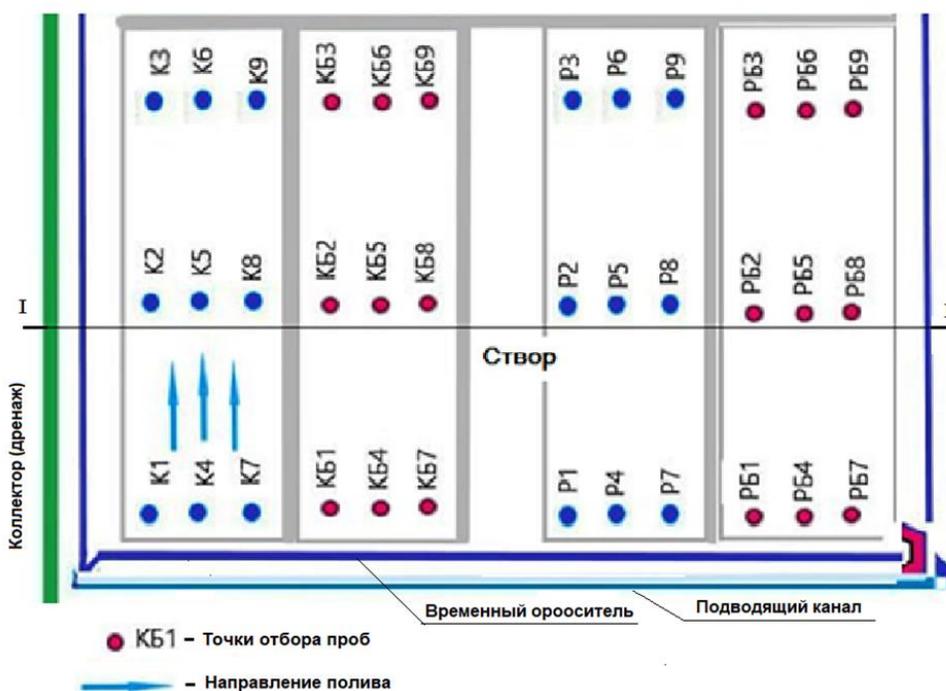


Рис.1. Размещение вариантов, точек контроля и створа на участке промывки по бороздам.

Fig.1. Placement of options, control points and crosssections in by furrow leaching in area.



Рис.2. Промывка засоленной почвы по бороздам.

Fig.2. Leaching saline soil by furrows.

Результаты и обсуждение

Сопоставление данных до и после промывки по ЕСе в образцах из всех промытых точек наблюдения показано в таблице 1.

Таблица 1. Результаты промывки почвы по вариантам опыта для горизонта 30-70 см (по данным всех точек наблюдений (за исключением непромытых))

Table 1. Results of soil leaching according to experimental options for a horizon of 30-70 cm (according to data from all observation points (except for unwashed ones))

Варианты	Засоление почвы по ЕСе, dS/m, в слое 30-70 см*			Снижение засоления почвы, % к исходному у	Объем поданной воды, м ³ /га	Удельные затраты воды, м ³ /га на 1 dS/m	Разница с контролем
	До промывки	После промывки	Изменение				
К	7,2	6,2	-1,0	-14	700	700	0
КБ	7,7	5,8	-1,9	-25	1000	526	-174
Р	9,6	7,7	-1,8	-19	850	472	-228
РБ	14,3	11,3	-3,0	-21	1400	467	-233

Различия до и после промывки статистически значимые (t -статистика > t критическое)

Из таблицы следует, что на вымыв солей влияют: исходная степень засоления почвы, а также изменения водно-физических свойств почвы при рыхлении, применение Биосолвента и количество поданной воды. В сравнении с Контролем, наибольший вынос солей, получен на вариантах с Биосолвентом (КБ и РБ, соответственно, - 25 % и 21 %). Наибольшая экономия удельных затрат воды получена на варианте РБ с сочетанием Рыхление + Биосолвент (233 м³/га на 1 dS/m).

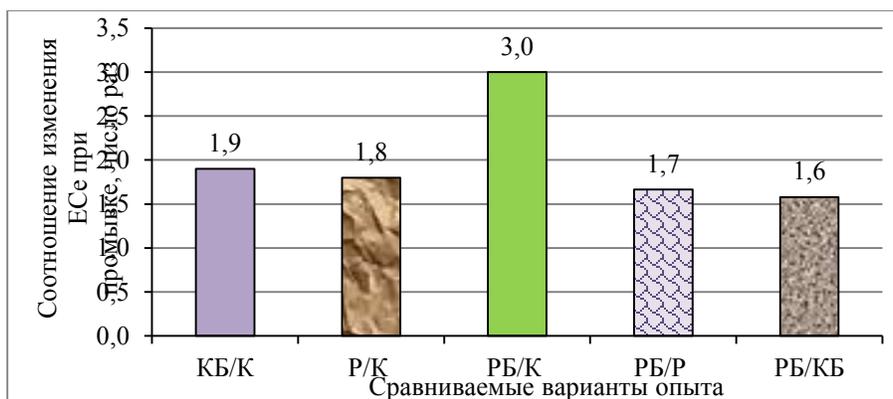


Рис.3. Иллюстрация количественных показателей эффективности рыхления почв и применения Биосолвента, выявленные по результатам опыта.

Fig.3. Illustration of quantitative indicators of the effectiveness of soil loosening and the use of Biosolvent, identified from the results of the experiment.

Таблица 1. Изменение показателей засоленности при промывке (и поливе) по бороздам на варианте рыхление + Биосолвент

Table 2. Changes in salinity indicators during leaching (and irrigation) by furrows using the loosening + Biosolvent

Код точки	pH	ЕСе, dS/m	Плот- ный оста- ток, %	Содержание растворимых ионов, в %					
				HCO ₃ '	Cl'	SO ₄ "	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na'
Промывка по бороздам									
До промывки									
РБ 2	7,7	10,8	1,212	0,015	0,109	0,660	0,098	0,048	0,182
РБ 5	7,7	11,2	1,386	0,018	0,084	0,820	0,150	0,048	0,190
РБ 8	7,7	8,5	1,086	0,012	0,025	0,660	0,126	0,046	0,100
Среднее	7,7	10,2	1,228	0,015	0,073	0,713	0,125	0,047	0,157
Отклон. Сред	0,000	1,111	0,105	0,002	0,032	0,071	0,018	0,001	0,038
После промывки									
РБ 2	7,9	7,4	0,726	0,018	0,035	0,416	0,100	0,028	0,058
РБ 5	7,8	9,0	1,036	0,017	0,049	0,600	0,142	0,043	0,075
РБ 8	8,1	6,9	0,672	0,022	0,018	0,400	0,096	0,023	0,052
Среднее	7,9	7,767	0,811	0,019	0,034	0,472	0,113	0,031	0,062
Отклон. Сред	0,111	0,822	0,150	0,002	0,011	0,085	0,020	0,008	0,009
Разница «после» -«до»	0,2	-2,4	-0,417	0,004	-0,039	-0,241	-0,012	-0,016	-0,096
То же, в % к исходному	3,0	-23,6	-33,9	26,7	-53,2	-33,8	-9,6	-33,8	-60,8
t-статистика	-2,65	4,54	10,61	-1,24	1,99	20,76	1,27	2,87	3,99
t критическое одностороннее	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
t критическое двухстороннее	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30
Вегетационный полив [11]									
Б-1 Т.1 до полива		8,1			0,065			0,036	
Б-1 Т.1 после полива		5,7			0,035			0,027	
Разница «после» -«до»		-2,4			-0,03			-0,009	
То же, в % к исходному		-29,6			-46,2			-25	

Обычная промывка по фону рыхления изменила засоление почвы (вариант Р, норма подачи воды 850 м³/га) на 1,8 dS/m. В варианте с Биосолвентом на рыхленной

почве (вариант РБ) выщелачивание солей составило 1,7 dS/m, при подаче воды 1400 м³/га.

Таким образом, данным исследованием выявлено воздействие рыхления почвы и опрыскивания Биосолвентом (как не рыхлённой, так и рыхлённой почвы) на эффективность выщелачивания солей при промывке почвы по бороздам. При применении Биосолвента, в сравнении с контролем (без рыхления почвы), выщелачивание солей увеличивается в 1,9 раза. При рыхлении почвы выщелачивание солей увеличивается в 1,8 раза. Применение Биосолвента по фону рыхления усиливает выщелачивание солей в 3 раза. Экономия воды для рассоления почвы в вариантах составила 174-233 м³/га (25-33 %) по отношению к контролю.

Изменение показателей засоленности почвы в варианте наиболее эффективной промывки по бороздам РБ (применение глубокого рыхления почвы с усилением выщелачивания солей препаратом Биосолвент по точкам створа, показанным на рисунке 1), приводится в таблице 2.

На основе данных по створу (таблица 2) при рассмотрении варианта промывки РБ выявлено следующее ранжирование снижения ионов и солей:

Na⁺- 60,8 %; Cl⁻ -53,2% SO⁴ и Mg^{..}-33,8 %; Ca^{..} -9,6 %; плотный остаток-33,9 %; ЕСе -23,6 %. Это значительно большие величины выщелачивания, чем на контрольном варианте: в 1,4-1,5 раза по общему количеству солей (ЕСе, плотный остаток) и в 1,9 раза - по Mg^{..}(при равном исходном содержании данного иона).

В таблице 2 также приведены данные о воздействии препарата Биосолвент для обработки почвы перед поливом хлопчатника на фоне рыхления гипсированной почвы средней степени засоления [11]. Уменьшение засоленности почвы по ЕСе на 29,6 % и по хлор иону на 46 % совпадают с данными, полученными при промывке.

Промывка по бороздам обеспечила влагозапасы в почве. По данным наблюдений за влажностью почвы в период вегетации (до полива) показало, что на варианте с рыхлением и с применением Биосолвента в слое 30-70 см, влажность была выше на 3-4 % (Таблица 3).

Таблица 2. Влажность почвы в вариантах опыта в слое 30-70 см на 2 августа 2023 г.
Table 2. Soil moisture in the experimental variants in the 30-70 cm layer as of August 2, 2023.

Коды точек створа	Варианты опыта					
	К	КБ	Среднее без рыхления	Р	РБ	Среднее с рыхлением
2	7,8	8,7	8,3	12,6	15,9	14,3
5	12,8	9,5	11,2	14,3	14,2	14,3
8	11,1	12,0	11,6	14,8	12,5	13,7
Среднее	10,6	10,1	10,3	13,9	14,2	14,1

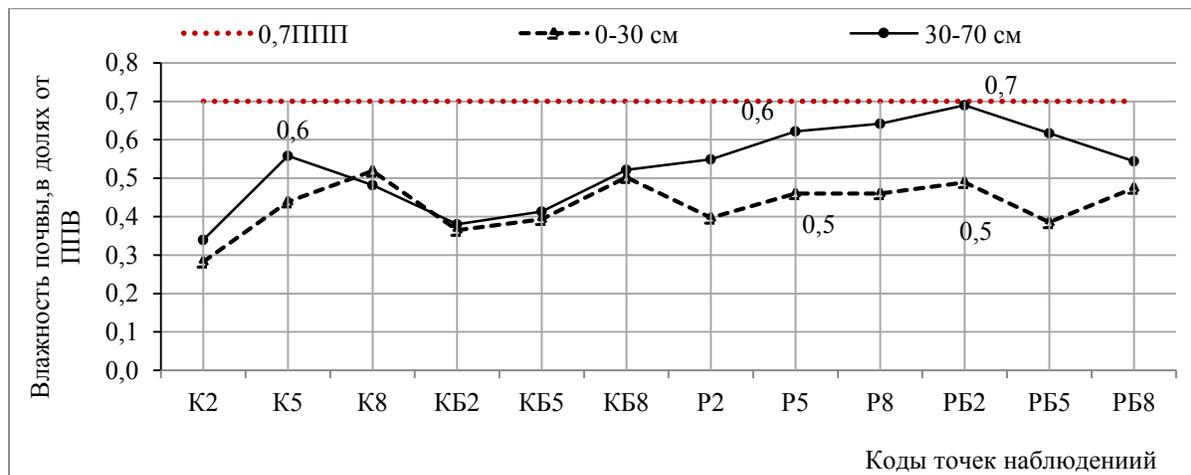


Рис.4. Влажность почвы, выраженная в долях от ППВ 2 августа в горизонтах 0-30 см и 30-70 см (в точках по створу)

Fig.4. Soil moisture, expressed as fractions of field capacity (FC) on August 2 in horizons of 0-30 cm and 30-70 cm (at points along by crosssection)

Выводы

1. Исследованием установлены количественные показатели влияния рыхления почвы и применения Биосолвента на усиление выщелачивания солей при промывке среднесоленных почв. Изменение водно-физических свойств почвы рыхлением усиливает выщелачивание солей в 1,6-1,8 раза, а изменение химических свойств почвы с помощью Биосолвента – в 1,7 -1,9 раза. Совместное воздействие рыхления и Биосолвента усиливает выщелачивание солей (по отношению к контролю) в 3,0 раза. Установлено также, что в условиях опытов рыхление способствует поддержанию влажности почвы в горизонте 30-70 см на 3-4 % выше, чем на контроле.

2. При совместном физико-химическом воздействии вышеуказанных мер на генетически сложные карбонатные почвы при промывках, по отношению к контрольному варианту, выщелачивание в 1,4-1,5 раза выше по ЕСс, плотному остатку *во сколько* и в 1,9 раза - по магнию. Наилучшим образом выщелачиваются: натрий (60,8 %), хлор (53,2%), магний (33,8 %), плотный остаток (33,9 %), ЕСс (23,6 %). Количественные показатели снижения засоленности почвы при вегетационном поливе в аналогичных (гипсированных) почвах совпадают с данными, полученными при промывке в карбонатных почвах.

3. Имеется необходимость теоретически обосновать взаимодействие физических, водных и химических факторов на процесс выщелачивания солей при применении рыхления и Биосолвента. Кроме того, в прикладных целях необходимо учитывать экономические затраты на улучшение свойств почв.

Литература

- Волобуев В.Р. (1945) Промывка засоленных почв. Азернешр, 20 с.
- Горохова И.Н., Чурсин И.Н. (2021) Карбонаты в орошаемых почвах прикаспийской низменности. Аридные экосистемы 2(87). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/karbonaty-v-oroshaemyh-pochvah-prikaspiyskoj-nizmennosti>. (дата обращения: 11.03.2024).
- Мамырбаева З. М. (1984) Солевая динамика при освоении гипсоносных засоленных почв зоны Южного Голодностепского Канала. Автореферат дисс. канд с.х-н. с.х-н.06.01.02 Москва, 24.с. <https://www.dissercat.com/content/solevaya-dinamika-pri-osvoenii-gipsonosnykh-zasolennykh-pochv-zony-yuzhnogo-golodnostepского>
- Мансуров Н.Х. (1991) Почвенно-мелиоративные условия юго-восточной части голодной степи (на примере совхоза "Пахтакор"). Автореферат дис. к.с/х.н.: 03.00.27 / АН УзССР. Ин-т почвовед. и агрохим. - Ташкент, 26 с.: ил. РГБ ОД, 9 91-5/3019-8
- Нерозин А.Е. (1974) Мелиорация засоленных орошаемых земель Узбекистана. Ташкент, 104 с.
- Садиев Ф.Ф., Рамазанов А.Р. (2020) Метод мелиорации засоленных и гипсированных почв Голодной степи с применением биологических и химических препаратов. Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов: в 2 кн. XV Международная научнопрактическая конференция (12-13 марта 2020 г.). Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2020. Кн. 1. – С. 399-401.
- Садиев Ф.Ф., Широкова Ю.И., Палуашова Г.К. (2023) Экспериментальное обоснование рассоления трудомелиорируемых почв с использованием биологических и химических препаратов. Ташкент.
- Садиев Ф.Ф., Юлдашев М.З., Широкова Ю.И., Палуашова Г.К., Якубов М.А.(2019) О методах восстановления гипсоносных и сильнозасоленных почв Сырдарьинской области в современных условиях. Irrigatsiya va melioratsiya 4(18), 7-13. doi: <http://tiame.uz/ru/article/phdforlan>
- Турабеков Б. Повышение эффективности освоения сильнозасоленных гипсоносных почв Джизакской степи : автореф. дис. ... канд. сель.-хоз. наук (06.01.02 - Мелиорация и орошаемое земледелие) - Ташкент, 1990. - 25 с. http://www.cawater-info.net/bk/water_land_resources_use/russian_ver/pdf/turabekov.pdf
- Bresler E, McNeal B L and Carter D L (1982) Management. In: Saline and Sodic Soils Advanced Series in Agricultural Sciences 10 (Springer, Berlin, Heidelberg) https://doi.org/10.1007/978-3-642-68324-4_3
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-68324-4_3 Google Scholar
- Shirokova Yu.I., Sadiev F.F., Paluashova G.Q. (2023) Water conservation in the reclamation of saline irrigated lands of Uzbekistan. E3S Web Conf. 386, 02003 DOI: 10.1051/e3sconf/202338602003.

УДК: 631(075.8)

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АРИДИЗАЦИИ И МЕЛИОРАЦИИ ПОЧВ С МЕТАМОРФИЧЕСКИМИ ГОРИЗОНТАМИ

¹Юлдашев Г., ¹Исагалиев М., ²Гончаров В.М., ¹Мамажонов И.

¹Ферганский государственный университет, г. Фергана, Республика Узбекистан
gulyam48@mail.ru

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
vmgoncharov@mail.ru

PHYSICAL BASES OF ARIDIZATION AND MELIORATION
OF SOILS WITH METAMORPHIC HORIZONS

¹Yuldashev G., ¹Isagaliev M., ²Goncharov V.M., Mamazhonov I.

¹Fergana State University, Fergana, Uzbekistan

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: The results of morphological studies and physicochemical analysis on the properties and factors of formation of meadow sasa soils with metamorphic horizons formed on the lacustrine-alluvial plains of Central Fergana and the role of these soils in the formation of wheat yield are presented.

Введение

В I веке до н.э. древнеримский автор трудов на тему сельского хозяйства Колумелла писал, что «лучшая почва та, что требует минимальных усилий для получения максимальных урожаев» (Дэвид Р. Монтгомери, 2015). Такими свойствами обладают мощные, высокогумусные, среднесуглинистые почвы, например, культурно-оазисные, высокоплодородные, благодаря оптимальным физическим, химическим свойствам. В обществе укоренилось мнение, что современные агротехнологии способны решить практически все проблемы, однако, несмотря на большие возможности и преимущества, они не способны решить проблему потребления продуктов питания - преобладание темпов над производством. В какой-то момент ограниченные почвенные и водные ресурсы, пригодные для сельскохозяйственного использования, будут исчерпаны, и поэтому уже сейчас остро встает вопрос повышения плодородия пахотных почв, а также вовлечение новых, ранее неиспользуемых и считающихся непригодными почвенных ресурсов.

Объекты и методы

Лимитирующим фактором плодородия зачастую становятся физические свойства почв. В Узбекистане к таким относятся орошаемые засоленные луговые сазовые почвы, имеющие на разных глубинах водо- и воздухонепроницаемые

метаморфические горизонты. Эти горизонты, залегающие на глубине от 20 до см 60 см и называемые арзык-шоховыми, остаются до сих пор малоизученными.

В их формировании особая роль принадлежит климату региона. Климат Ферганской долины представлен в работах многих авторов (Кузиев, Сектименко, 2009), и по сведениям А.Ф.Миддендорфа, В.П.Наливкина, В.В.Бартольда в прошлом ее дно было покрыто многочисленными озерами и болотами с густыми камышовыми зарослями. В настоящее время климат характеризуется как субтропический умеренно-теплый, с короткой теплой зимой и жарким сухим продолжительным летом. Среднесуточная температура воздуха в пустынной зоне Ферганской долины по данным метеостанции «Коканд» за 10-летний период колеблется в диапазоне 14,3-16,4°C. Среднегодовое количество осадков в пустынной зоне за 10-летний период составило 127,3 мм, максимальное их количество выпадает в зимне-весенний период (табл.1). За последние пять лет наблюдался рост температуры на 0,3-0,6°C, снижение скорости ветра и количества осадков.

Таблица 1. Динамика температуры почвы и количества осадков в 2014-2023 г.г.:
первая строка - Фергана, вторая - Коканд, третья - Кува.

2014	2015	2016	2017	2018	Средняя за 5 лет	2019	2020	2021	2022	2023	Средняя за 5 лет
максимальная температура поверхности почв, °С											
67,5	72,3	68,6	70,6	67,1	69,2	70,0	71,1	69,5	68,5	72,3	70,3
71,0	72,0	69,0	72,0	75,0	69,2	75,0	75,0	76,0	75,0	76,0	75,4
64,2	65,5	60,2	63,6	65,2	63,7	66,2	67,0	61,6	65,2	65,2	65,0
минимальная температура поверхности почв °С											
-21,0	-11,4	-14,3	-7,4	-12,7	-13,4	-7,5	-11,0	-13,3	-9,2	-13,5	-11,0
-13,0	-19,5	-11,0	-13,0	-14,0	-14,1	-8,0	-10,0	-11,0	-5,5	-13,2	-9,5
-26,8	-13,0	-19,5	-10,2	-10,0	-15,9	-7,5	-11,1	-12,2	-11,0	-20,8	-12,5
осадки, мм											
178,1	216,6	224,9	170,6	185,1	195,1	124,2	115,6	104,1	156,2	127,9	125,6
88,9	154,6	136,2	134,8	149,9	132,9	129,6	113,7	66,0	190,1	108,9	121,7
222,7	269,3	265,8	229,2	221,5	241,7	114,7	180,4	66,5	215,2	161,5	147,7

Максимальная температура поверхности и почв в Фергане в последние 5 лет составила 70,3°C, а в предыдущие пять 69,2°C. В Коканде эти показатели составили, соответственно, 75,4°C и 69,2°C, т.е. за последние 5 лет температура поверхности почвы в среднем поднялась на 6,2°C. Приведенные данные свидетельствуют об

аридизации климата, его резкой континентальности: летом здесь жарко, и почвы нагреваются до 70-75°C, зимой и весной редкие осадки, промерзание почвы достигает глубины 10-15 см. Природная растительность крайне разрежена и скудна. Имеются сведения, что северная граница аридного пояса Центральной Азии отодвинута на север. Для классификации засушливости земель региона наибольшее распространение получил индекс влажности (Золотокрылин, 2002). Однако, автор пишет, что по этому индексу существует значительная неопределенность в оценке распространения аридных земель, и необходим индекс аридности. Надо отметить, что на сегодняшний день климатические составляющие опустынивания выражены сильнее, чем другие факторы.

Опустынивание трансформирует физические и химические свойства почв, в частности, эволюционируют луговые сазовые почвы с гидрогенно-аккумулятивными горизонтами. Эти горизонты обладают ярко выраженными неблагоприятными агрофизическими свойствами, существенно лимитирующими их плодородие. Особенности почв со слабопроницаемыми метаморфическими горизонтами отмечались ранее в работах Е.И. Панковой, М.И. Герасимовой (2012), Ф.Р. Зайдельмана (2004) и других исследователей.

Результаты и обсуждение

Исследования луговых сазовых почв с метаморфическим горизонтом, проведенные в Язъяванском районе Ферганской области, территория которого является «дном» озерно-аллювиальной равнины, показали, что в условиях пустынь эти почвы имеют с поверхности относительно высокую пористость и удовлетворительные водно-воздушные условия. Содержание гумуса в верхнем 0-20 см слое около 1%, в метаморфических горизонтах практически отсутствует. Гидрогенно-аккумулятивный сильно сцементированный горизонт формируется при аккумуляции железа, кремния и других элементов за счет выпадения из почвенных, приносимых грунтовых, поливных, озерных вод. Цвет метаморфического горизонта в условиях сазового режима отличается светло-желтовато-бурой окраской с желтыми и палевыми оттенками. В условиях засоления на поверхности метаморфического горизонта высоко содержание карбонатов, гипса, водорастворимых солей. Химические новообразования в метаморфических горизонтах встречаются в форме налетов, крупинок, обнаруживается при разломе, что тоже характерно для засоленных почв. Карбонаты кальция и магния наблюдаются по всему профилю, соединения железа - на свежих образцах. Кремнезем образует налеты и выделяется как отдельная структурная единица. Копролиты, дендриты в метаморфических горизонтах практически не встречаются. Общая мощность почвенного профиля до материнской породы в пределах 2 м. В аналогичных мелко-арзыково-солончаковых почвах Центральной Ферганы с глубиной залегания метаморфического горизонта 30-60 см водопроницаемость,

начиная с 30 см, составила в среднем за шесть часов 0,26 мм/мин, а значение коэффициента фильтрации 0,36 м/сут классифицируется как средний (Шейн, Гончаров, 2006). Там, где этот горизонт начинался с 20 см, водопроницаемость изменялась за 8 часов наблюдений в пределах 0,1-0,3 мм/мин, коэффициент фильтрации 0,13 м/сут, т.е. низкий.

Морфологические особенности исследованных луговых сазовых почв с метаморфическим горизонтом территории озерно-аллювиальной равнины представлены ниже на примере одного из разрезов:

А_{пах} 0-20 см. Светло-серый в сухом состоянии, слегка влажный, свежий, среднесуглинистый, мелкозернистый, слабо пористый, корешки, ходы землероев, в середине горизонта фрагменты разрушенного метаморфического горизонта размером 1-3 см², переход резкий по плотности и по цвету.

А_{п-п} 20-59 см. Светло-желтовато-бурый с палевым, нужно характеризовать как переходный к метаморфическому, но в связи с тем, что много лет в сельскохозяйственном использовании, выделяют как подпахотный, средне- и легкосуглинистый, мелкозернистый, имеются единичные мелкие корешки на поверхности, слабовлажный, комковато-глинистый, при разломах, очень плотный, корешков не обнаружено, после механического разрушения много желтоватых небольших пятен, на воздухе при подсыхании слабо заметные белые солевые пленки, много новообразований железистых, марганцево-железистых, карбонатно-гипсовых скоплений, переход резкий по гранулометрическому составу.

В₁ 59-71 см. Серовато-желтоватый, мелкий песок с ржавыми пятнами, легкий суглинок, увлажненный, пористый, остатки корней, древних растений (вероятно, камыш), много новообразований, переход постепенный по окраске.

В₂ 71-80 см. Светло-желтый песок, также песок зольного цвета, но увлажненный, вниз увеличиваются желтоватые, жёлто-коричневые пятна, корешков и включений нет, переход постепенный по цвету.

В₃ 80-112 см. По основным морфологическим признакам напоминает предыдущий горизонт, увлажненный песок, редкие черные пятна, супесь с неоднородной окраской.

С 112-210 см. Слабый пепельный цвет, мелкий однородный песок и супесь, редкие ржавые пятна.

Глубина залегания грунтовых вод ниже 2,5 м.

Исследования основных физических свойств почв проводились по трем вариантам производственного опыта с разрушением метаморфического горизонта, заложенного весной 2020 года на поле площадью 9,2 га и занятого посевами пшеницы (территория фермерского хозяйства «Мукаррамхон»):

1 – контроль, сцементированный метаморфический горизонт на глубине 20-30 см,
2 – метаморфический горизонт механически разрушен специальным рыхлителем весной 2020 года,

3 – метаморфический горизонт разрушен, плиты размером 15-25 см² вынесены за пределы опытного участка.

Таблица 2. Физические свойства луговых сазовых почв в различных вариантах производственного опыта (Язъяванский район, Ферганская область)

ант	Глубина, см	Плотность, г/см ³		Пористость, %	Водопроницаемость, мм/мин
		почвы	тв. фазы		
1 - метаморфический горизонт не нарушен	0-20	1,38	2,54	45,7	0,24
	20-47	2,01	2,78	27,7	отсутствует
	47-71	1,58	2,60	39,2	0,19
	71-112	1,54	2,63	41,4	0,15
	112-120	1,56	2,65	41,1	0,21
2 - метаморфический горизонт разрушен специальным рыхлителем	0-20	1,36	2,56	46,9	0,18
	20-45	1,72	2,68	35,6	0,09
	45-71	1,53	2,62	39,3	0,23
	71-112	1,58	2,60	39,2	0,17
3 - метаморфический горизонт разрушен и вынесен за пределы опытного участке	71-120	1,59	2,64	39,8	0,15
	0-33	1,34	2,52	46,8	0,27
	33-59	1,54	2,66	42,1	0,19
	59-71	1,55	2,62	40,8	0,21
	71-112	1,56	2,64	40,9	0,24
	112-120	1,58	2,66	40,6	0,21

Результаты исследований, проведенных летом 2023 года, показали (табл.2), что верхний пахотный слой на всех участках имеет однородное сложение с плотностью 1,34-1,38 г/см³. Резкие различия проявляются именно с глубины залегания метаморфического горизонта 30 см: на 1 участке он выделяется чрезмерно высокой плотностью – 2,01 г/см³. Общая пористость метаморфического горизонта весьма чрезмерно низкая 27%, как и его водопроницаемость, которая местами отсутствует. Такая плотность, помимо снижения влагопроводящих свойств, препятствует развитию корневой системы растений. Плотность твердой фазы также увеличивается до весьма высоких значений - 2,78 г/см³, что является следствием содержания плотных гидрогенных соединений. Неблагоприятные агрофизические свойства, низкая воздухопроницаемость в условиях орошения сопровождаются и обусловленными ими окислительно-восстановительными процессами, протекающими на поверхности метаморфического горизонта, аккумуляцией водорастворимых солей. Под непроницаемым метаморфическим горизонтом при близком залегании грунтовых вод возникают условия анаэробноз. Разрушение

метаморфического горизонта (вариант 2) привело к закономерному снижению плотности до $1,72 \text{ г/см}^3$, хотя эти значения также являются высокими за счет присутствия плотных фрагментов. Пористость почвы увеличилась на 8% и составила 35%. Перемешивание повлияло и на плотность твердой фазы, она понизилась до $2,68 \text{ г/см}^3$. Наиболее существенно изменило физическое состояние разрушение и вынос фрагментов метаморфического горизонта – здесь плотность снизилась до естественных значений $1,55 \text{ г/см}^3$, а пористость возросла до 42%. Глубже 50 см в физических свойствах почв участков различий не обнаружено, т.к. имея сходный гранулометрический состав, они проявляют однородность и в агрофизическом состоянии. Ос

Лимитирующее влияние физических свойств почв на условия роста и развития растений закономерно и ярко проявилось в урожае пшеницы (сорт Юка, 2023 г.): на 1 участке он составил 30,03 ц/га, на 2 - 41,43 ц/га, на 3 - 60,30 ц/га.

Выводы

Исследования показали, что лимитирующим фактором плодородия луговых сазовых почв, имеющих в профиле на глубине 20-30 см метаморфический арзык-шоховый горизонт, являются его неблагоприятные агрофизические свойства, прежде всего, чрезмерно высокая плотность и низкая пористость, снижающие водопроницаемость и затрудняющие рост корневой системы растений. Однако, даже при наличии метаморфического горизонта в своем естественном состоянии они остаются рентабельны, и урожай пшеницы сорта Юка окупает затраты на ее возделывание. При проведении специальной обработки, заключающейся в разрушении и выносе разрушенного метаморфического горизонта, можно улучшить их агрофизическое состояние и существенно повысить урожай в 3 раза, достигнув уровня интенсивного земледелия.

Литература

- Дэвид Р. Монтгомери. (2015) Почва эрозия цивилизаций. Анкара, 27с.
Кузиев Р.К., Сектименко В.Е. (2009) Почвы Узбекистана. Т. 352 с.
Золотокрылин А.Н. (2002) Индикатор аридности климата. *Аридные экосистемы* **8(16)**, 49-69.
Панкова Е.И., Герасимова М.И. (2012) Пустынные почвы: свойства, почвообразовательные процессы, классификация. *Аридные экосистемы* **2(51)**, 5-17.
Зайдельман Ф. Р. (2004) Мелиорация почв. М. 400 с.
Шейн Е.В., Гончаров В.М. (2006) Агрофизика. Ростов-на-Дону. «Феникс», 400 с.

СТАТЬИ МОЛОДЕЖНОГО ФОРУМА

УДК 631.43

СРАВНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СРЕДНЕСУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ МОСКВЫ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ В КОНТЕКСТЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Л. И. Аракелова^{1*}, А. Б. Умарова¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

* E-mail: arakelovali@my.msu.ru

COMPARISON OF RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF SOD-PODZOLIC MEDIUM LOAMY SOILS OF DIFFERENT LAND USES

L. I. Arakelova, A. B. Umarova

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: The mechanical characteristics of soils of the same genesis and different land uses have been studied: (1) background - sod-podzolic medium loam on cover loams, (2) park - sod-podzolic superficially turbinated, low-power medium loam soil on cover loams and (3) urban - urban stratossem medium-thick, deeply weakly peeled, medium loam on man-made sediments underlain by cover loams loam. A comparison of rheological parameters for the three studied soils was carried out. Based on their values, a comparative assessment of soil resistance to external loads was carried out. The strength of structural bonds, estimated by the parameter of the initial modulus of elasticity, is greatest in the background soil. The maximum value among the horizons of all three sections is the eluvial horizon of the sod-podzolic soil of the park territory. A wide range of linear viscoelastic state distinguishes the horizons of the urban stratozem of the middle range.

Введение

За последние десятилетия в условиях активной урбанизации вырос интерес к улучшению качества городской среды, в котором вопросы озеленения и грамотной эксплуатации почв для градостроительства играют важную роль (Бахматова и др., 2022). Функционирование почвенного покрова требует оценки его устойчивости к различным воздействиям, в том числе, механическим, что весьма актуально для предотвращения смыва почв, эрозионных процессов и оползней, а также для их рационального использования.

Городские почвы отличаются высокой изменчивостью, что обусловлено множеством факторов: сочетанием в одной почве исходного природного и привезенного грунтов и почв, наличием антропогенных включений, временем и особенностями антропогенного воздействия на почву, климатом и землепользованием. При исследовании урбаноземов выделяют основные проблемы их деградации, которые способны влиять на прочностные характеристики почв: уплотнение, искусственное наслоение, разрушение структуры, наличие антропогенных включений, наличие органического вещества антропогенного происхождения (Rate, 2022).

Отметим еще один немаловажный аспект, влияющий на эволюцию почв урбанизированных территорий крупных мегаполисов, – это более теплый климат по сравнению с пригородной (Kislov et al., 2015). Москва, имеющая плотную застройку, представляет собой пример территории со специфичной термической структурой городской атмосферы (Кислов и др., 2017), получившей в начале XIX века название «остров тепла», как результат изменений в радиационном, тепловом и водном балансах поверхности и приземного воздуха в городах (Локощенко и др., 2016). Поэтому сравнительный анализ свойств городских и пригородных почв дает возможность оценить пути возможной трансформации зональных почв при изменении климата. Действительно, в последние десятилетия наблюдается значительное увеличение количества осадков в северном полушарии, возможно, обусловленное повышением общепланетарной среднегодовой температуры, которая - по прогнозам к концу XXI века - увеличится на 4–7 °C (Jones et al., 1999; МГЭИК: Изменение климата..., 2007; IPCC, 2013).

Реологические параметры по мнению многих авторов (Хайдапова и др., 2014; Markgraf, Horn, 2006) являются весьма чувствительными к изменению физических и химических свойств почв и позволяют исследовать трансформацию структуры почв, анализировать ее устойчивость в условиях изменения климата и процессов урбанизации.

Целью работы является сравнительный анализ реологических характеристик дерново-подзолистой почвой Московской области, слабоизмененной дерново-подзолистой почвы и урбанозема, расположенных в г. Москве на территории МГУ имени М.В. Ломоносова.

Были поставлены следующие задачи: 1) определить реологические характеристики исследуемых почв: начальный модуль накопления (модуль упругости), G' (Па); диапазон линейного вязкоупругого состояния — LVE-range (%); точку пересечения модулей накопления (упругости) и потерь (вязкости) — точка начала области вязкого течения — Crossover; 2) сравнить реологические параметры трех исследуемых почв.

Объекты и методы

Климат Москвы и области характеризуется как умеренно-континентальный с относительно мягкой зимой с редкими оттепелями и теплым сравнительно влажным летом. Среднегодовое количество осадков - около 650 мм, причем наибольшее количество осадков приходится на весенне-летний период. Условия г. Москвы соответствуют зоне умеренного потенциала загрязнения атмосферы. (<https://meteoinfo.ru/>).

Объектами исследования были выбраны следующие варианты почв:

Дерново-подзолистая среднесуглинистая на покровных суглинках (**фон**). Разрез был заложен на территории Пушкинского района Московской области, в 700

м к западу от дер. Дарьино (Подмосковье). Координаты – 56.097046 N, 37.836833 E. Местоположение находится в ведении Правдинского участкового лесничества.

Дерново-подзолистая поверхностно турбированная, маломощная, глубоко осветленная среднесуглинистая почва на покровных суглинках (**парк**). Разрез был заложен в юго-западной части Москвы на территории МГУ имени М.В. Ломоносова. Растительность – посадки липы сердцелистной (*Tilia cordata*), слабо выраженный травянистый покров. Координаты: 55.706187 N, 37.5396461 E.

Урбостратозем среднемощный, глубоко слабо оглеенный, среднесуглинистый на техногенных отложениях, подстилаемым покровными суглинками (**урба**). Координаты: 55.706757 N, 37.521630 E. Разрез был заложен на территории Метеорологической станции МГУ (западная часть метеоплощадки). Разрез расположен на относительно плоской поверхности. Проектное покрытие около 98%, травянистая растительность. Опад с деревьев (сухие листья, ветки) на участок с разрезом не попадает или убирается.

Названия почв даны в соответствии с принципами диагностики и классификации почв России 2004 г. (Классификация..., 2004) и с Полевым определителем почв России (Полевой определитель..., 2008). Для классификации городских почв использовали также классификационные разработки группы авторов — предложение по включению городских почв в Классификацию почв России (Прокофьева и др., 2014).

Реологические параметры насыпных образцов почв, предварительно просеянных через сито 1 мм и подвергшихся суточному капиллярному увлажнению, определялись методом амплитудной развертки на модульном компактном реометре MCR-302 (Anton Paar, Австрия) в трехкратной повторности (Хайдапова и др., 2016). Анализ данных вели по средним величинам.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим кривые зависимости модуля накопления (G' , Па) от деформации (γ , %) исследуемых почв (Рис.1).

Дерново-подзолистая почва (фон) имеет дифференцированный характер расположения кривых по профилю, и она же характеризуется высоким разбросом между ними. Реологические кривые парковой почвы весьма однородны в пределах каждого горизонта, за исключением подзолистого, кривые которого расположены выше остальных.

Отметим, что в обеих дерново-подзолистых почвах – естественной и городской, последовательность расположения кривых генетических горизонтов схожа: ниже остальных находятся верхние гумусовые горизонты АУ и АУ, чуть выше - переходные к подзолистому АУЕЛ и АУТСН. Однако форма кривых гумусовых горизонтов различается. В парковой почве они имеют пологий характер с очень небольшой способностью к проявлению упругих свойств, на что указывает

практически сглаженная форма в области низкого напряжения. С глубиной формы кривых фоновой и парковой близки.

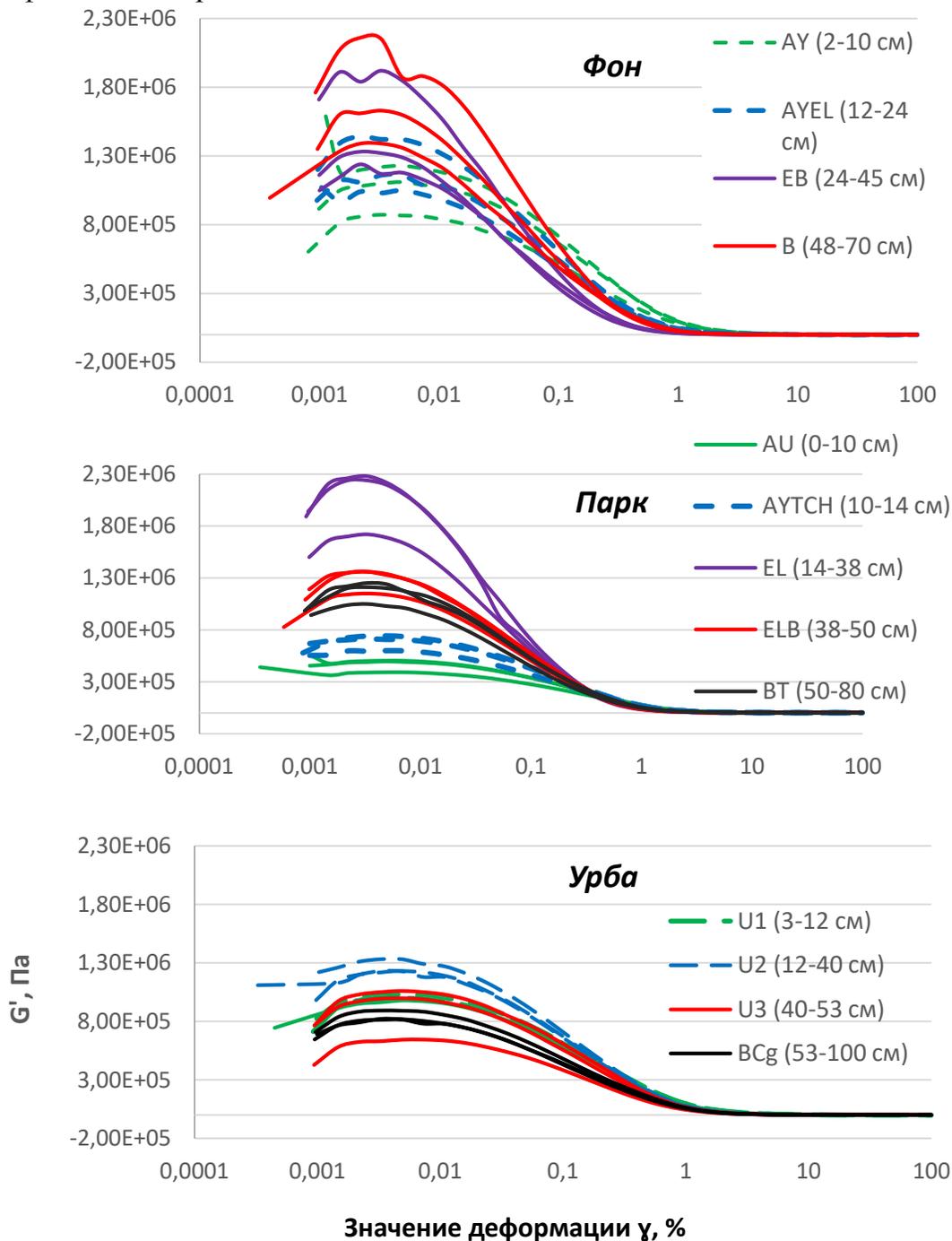


Рис. 1. Кривые зависимости модуля накопления (G' , Па) от деформации (γ , %) для исследуемых почв

Сглаженной формой кривых всех горизонтов характеризуется урбанозем, он же является наименее дифференцированным из всех изученных почв, хотя немного большей прочностью обладают верхние горизонты.

В табл. 1 представлены профильные распределения реологических показателей исследуемых почв. Модуль накопления или модуль упругости (G' , Па), являющийся мерой энергии деформации, сохраненной образцом во время процесса сдвига после прекращения сдвигового усилия, действует как движущая сила для восстановления полученных деформаций (Mezger, 2011). В дерново-подзолистой фоновой почве прочность структурных связей увеличивается с глубиной. Близкие значения получены для городских почв. Модуль накопления наибольший в элювиальном горизонте дерново-подзолистой парковой почвы EL (14–38 см). Наименее прочными связями со слабой дифференциацией величин по профилю обладает урбостратозем — разница между горизонтами слабо выражена.

Диапазон линейной вязкоупругой деформации почв характеризует область, в которой структура образца способна вернуться в исходное состояние (Mezger, 2011). Наименьшие значения данного показателя имеет фоновая почва, особенно ее оподзоленная часть, в сравнении с городскими почвами. Причем высокие значения обнаружены для всех горизонтов урбостратозема. Интересно отметить, что максимальные и очень близкие значения диапазона вязкоупругой деформации (0, 00567 %) выявлены в почвах территорий парка и метеостанции, но на разных глубинах: AU (0-10 см) и UR3 (40-53 см) соответственно.

Значения точки Crossover характеризуют границы перехода тела из пластичного в вязко-текучее состояние, т.е. при достижении этой величины под действием прикладываемой силы в образце происходят необратимые разрушения структурных связей, и почва переходит в область текучего поведения (Mezger, 2011).

Профиль парковой дерново-подзолистой почвы оказался очень дифференцированным по данному параметру: максимальные величины предела текучести наблюдаются в верхнем гумусированном слое, затем значения резко уменьшаются в подзолистом слое и, после некоторого увеличения в оподзоленных горизонтах, снова снижаются в нижних слоях. Фоновая почва и урбостратозем характеризуются меньшей устойчивостью к нагрузке и переходят в необратимое текучее состояние с продолжающимся медленным разрушением наиболее прочных структурных связей, причем особенно ясно это представлено в горизонте UR2 (12-40 см) урбостратозема.

Таблица 1. Статистические характеристики реологических параметров изучаемых почв

Вид почвы	Горизонт, см	Влажность, %		G', Pa		LVE-range, %		Crossover, %	
		\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$
Фон	AУ (2-10)	61,2	1,60	1,07E+06	1,06E+05	0,00435	0,00053	1,54	0,18
	AEL (12-24)	49,1	0,32	1,21E+06	1,10E+05	0,00488	0	1,70	0,31
	EB (24-45)	33,4	0,19	1,50E+06	2,13E+05	0,00255	0,00035	2,14	0,48
	B (48-70)	34,7	0,33	1,73E+06	2,27E+05	0,00291	0,00035	1,40	0,14
Парк	AУ (0-10)	70,9	1,57	4,63E+05	3,66E+04	0,00567	0,000793	4,11	0,77
	AУТCH (10-14)	57,3	0,43	6,85E+05	4,35E+04	0,00435	0,000533	2,79	0,28
	EL (14-38)	35,8	0,35	2,08E+06	1,80E+05	0,00328	0,00000667	2,00	0,42
	ELB (38-50)	36,6	0,85	1,29E+06	7,00E+04	0,00327	0,00000333	1,43	0,23
	BT (50-80)	42,2	0,58	1,17E+06	6,11E+04	0,00327	0,00000333	1,83	0,14
Урба-	UR1 (3-12)	43,2	0,78	1,00E+06	1,55E+04	0,00488	0	1,56	0,03
	UR2 (12-40)	37,0	1,76	1,26E+06	3,33E+04	0,00488	0	1,22	0,04
	UR3 (40-53)	45,8	2,78	9,01E+05	1,30E+05	0,00567	0,000793	1,57	0,23
	BCg (53-100)	41,0	0,58	8,44E+05	2,52E+04	0,00381	0,000533	1,76	0,13

Заключение

Был проведен анализ реологических кривых среднесуглинистых почв Москвы и Московской области, позволивший выявить специфику реологического поведения почв в условиях города. Исследованные почвы можно выстроить в последовательности изменения прочностных свойств по средним значениям реологических параметров:

- по начальному модулю упругости: фон > парк > урбостратозем;
- по диапазону линейного вязкоупругого состояния: урбостратозем > парк > фон;
- по величине Crossover: парк > фон > урбостратозем.

В ряду исследованных почв фон – парк – урбанозем различия в реологическом поведении слагающих их почвенных горизонтов снижаются. Фоновая почва оказалась весьма дифференцированной, ее горизонты обладают высокими показателями начального модуля упругости. Парковая почва имеет черты сходства с фоновой расположением реологических кривых: верхние горизонты находятся в области низкого напряжения, а верхние – в области высокого. Горизонты урбостратозема имеют низкие значения начального модуля упругости и точек Crossover на фоне широкого диапазона вязкоупругого состояния: он способен сохранять свою микроструктуренность при более высоких нагрузках по сравнению с остальными исследованными почвами.

Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды»

Литература

- Бахматова К.А., Матинян А.А., Шешукова А.А. (2022) Антропогенные почвы городских парков (обзор) Почвоведение **1**, 77-95
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме (2014)
- Кислов А.В., Варенцов М. И., Горлач И. А., Алексеева Л. И. (2017) Остров тепла Московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления *Вестник Московского университета* **4**, 12–19
- Классификация и диагностика почв России, 2004
- Локощенко М.А., Корнева И.А., Кочин А.В., Дубовецкий А.З., Новицкий М.А., Разин П.Е. (2016) О высотной протяженности городского острова тепла над Москвой Доклады РАН **466 (2)**, 213–217
- МГЭИК (2007) Изменение климата, 2007 г: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Пачаури, Р. К., Райзингер, А., и основная группа авторов (ред.)]. МГЭИК, Женева, Швейцария
- Полевой определитель почв России (2008)
- Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С. и др. (2014) Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России Почвоведение **10**
- Хайдапова Д.Д., В. В. Честнова В.В., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. (2016) Реологические свойства чернозёмов типичных (Курская область) при различном землепользовании Почвоведение **8**, 955–963
- Шеин Е.В., Початкова Т.Н., Холодков А.И. (2016) Реологические свойства дерново-подзолистой почвы Вестник Оренбургского государственного университета **6**
- Biasioli M., Berberis R., Ajmone-Marsan F. (2006) The influence of large city on some soil properties and metal content *Sci. Total Environ* **356**
- Burghardt W. (1994) Soils in urban and industrial environments *Journal Plant Nutr. Soil Sci* **157**
- Fokaides P., Kylili A., Nicolaou L., Ioannou B. (2016) The effect of soil sealing on the urban heat island phenomenon *Indoor and Built Environment* **25**, 1136-1147
- IPCC (2013) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Jones C.J., Rikli R.E., Beam W.C. (1999) A 30-s chair-stand test as a measure of lower body strength in community-residing older adults *Res Q Exerc Sport* **70(2)**. doi: 10.1080/02701367.1999.10608028. PMID: 10380242.
- Kaluza-Haladyn A., Jamroz E., Bekier J. (2019) Humic substances of differently matured composts produced from municipal solid wastes and biomass of energetic plants *Soil Sci. Annu.* **70**, 292–297
- Kislov A., Konstantinov P., Varentsov M., Samsonov T., Gorlach I., Trusilova K. (2015) Urban amplification of the global warming in Moscow megacity EGU General Assembly 2015. *Geophysical Research Abstracts* **17**
- Markgraf W., Horn R., Peth S. (2006) An approach to rheometry in soil mechanics – Structural changes in bentonite, clayey and silty soils *Soil & Tillage Research* **91**, 1-14
- Mezger T.G. (2011) *The Rheology Handbook for users of rotational and oscillatory rheometers.* – 3rd revised edition, 436
- Prokop G., Jobstmann H., Schonbauer A. (2011) Report on best practices for limiting soil sealing and mitigating its effects Technical Report – 2011 – 050. Brussels: European Commission, DG Environment
- Rate, A.W. (2022) *Spatial Variability and Data Analysis in Urban Soils* *Urban Soils. Progress in Soil Science* Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87316-5_3

УДК 631.445.4+631.43+631.8

ВЛИЯНИЕ ЦЕОЛИТА И УДОБРЕНИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ НА АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Волкова Е.С., Пятова А. А.

Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Ульяновск,
Российская Федерация
volkova-ivinaelena@yandex.ru

THE EFFECT OF ZEOLITE AND FERTILIZERS BASED ON IT ON THE AGROPHYSICAL
PROPERTIES OF THE SOIL WHEN EXPOSED TO CROPS

Volkova E.S., Pyatova A.A.

P. A. Stolypin Ulyanovsk State Agrarian University, Ulyanovsk, Russian Federation

Annotation: the effect of experimental fertilizers on soil density and structure has been studied. It was found that a significant effect on its agrophysical properties was exerted by a fertilizer based on zeolite enriched with amino acids at a dose of 500 kg/ha.

Введение

Ухудшение агрофизических и агрохимических свойств почв лесостепи Поволжья в результате интенсивного их использования приводит к снижению продуктивности сельскохозяйственных культур (Чекаев, Рябов, Власова, 2019).

Регулирование физических свойств почвы, к которым относятся гранулометрический состав, структурное состояние, плотность и пористость, имеет важное значение для создания условий нормального протекания биологических и биохимических процессов, определяющих ее эффективное плодородие (Кафтан, Зенкова, 2019; Мамиев, 2023).

Большой интерес в этом отношении представляет использование кремнистых пород с высоким содержанием кремния, в частности цеолит как удобрение сельскохозяйственных культур. Цеолит, благодаря особенностям кристаллоструктурного строения и минералогического состава, отличается высокой сорбционной способностью, ионообменной способностью и каталитической активностью (Kulikova, Volkova, Yashin, 2023).

Цеолиты способны улучшать физическое состояние почвы, благодаря присутствию в них аморфного кремнезема (Куликова, Карпов, Яшин, 2020; Cataldo, Salvi, Paoli, 2021).

Объекты и методы

Исследования по изучению эффективности цеолита и экспериментальных удобрений на его основе проводили на опытном поле ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ в 2020–2023 гг. в агроценозах озимой пшеницы (*Triticum aestivum*) сорта Саратовская 17 и сои (*Glycine max*) сорта УГСХИ–6. В опыте в качестве удобрения использовался цеолит Юшанского месторождения Ульяновской области; цеолит, обогащенный аминокислотами; цеолит, обогащенный карбамидом.

Учетная площадь делянок при возделывании озимой пшеницы и сои составляла 20 м² каждая, повторность 4-х кратная, размещение рендомизированное. Почвы опытных полей чернозем типичный (озимая пшеница) и чернозем выщелоченный (соя).

Технология возделывания озимой пшеницы и сои основывалась на общепринятых в Ульяновской области агротехнических приемах.

Схема опыта при возделывании обеих культур была следующая:

1. Контроль;
2. Цеолит, 250 кг/га (Ц, 250 кг/га);
3. Цеолит, 500 кг/га (Ц, 500 кг/га);
4. Цеолит, обогащенный аминокислотами, 250 кг/га (Ц+А, 250 кг/га);
5. Цеолит, обогащенный аминокислотами, 500 кг/га (Ц+А, 500 кг/га);
6. Цеолит, обогащенный карбамидом, 250 кг/га (Ц+К, 250 кг/га);
7. Цеолит, обогащенный карбамидом, 500 кг/га (Ц+К, 500 кг/га);
8. N₄₀P₄₀K₄₀ (нитрофоска с содержанием элементов 16 %)

Результаты и обсуждение

Регулирование агрофизических свойств почвы имеет исключительно важное значение в создании оптимальных почвенных условий для роста и развития растений (Долгополова, Малышева, Нагорных, 2021). В таблице 1 и 2 представлены агрофизические показатели чернозема выщелоченного при возделывании сои и чернозема типичного при возделывании озимой пшеницы с использованием в качестве удобрения цеолита, а также цеолита, обогащенного аминокислотами и карбамидом.

Исследования показали, что физическое состояние почвы опытного поля мало соответствует требованиям возделываемых культур: плотность пахотного слоя на контроле составляла 1,23 и 1,21 г/см³ под соей и под озимой пшеницей соответственно, содержание агрономически ценных агрегатов размерами 10–0,25 мм 48,6 и 59,8 %, коэффициент структурности ниже оптимальных значений. Следует отметить, что как озимая пшеница, так и соя являются требовательными к физическому состоянию почвы.

Таблица 1. Агрофизические показатели пахотного слоя чернозема выщелоченного в зависимости от внесения в почву экспериментальных удобрений (0-30 см) под посевами сои

№ п/п	Варианты	Содержание агрегатов, % (сухое просеивание)			Коэффициент структурности	Плотность, г/см ³
		>10 мм	10-0,25 мм	<0,25 мм		
1	Контроль	31,7	48,6	19,7	0,95	1,23
2	Цеолит 250 кг/га	39,4	57,2	10,2	1,15	1,20
3	Цеолит 500 кг/га	24,3	54,3	21,4	1,19	1,17
4	Цеолит, обогащенный аминокислотами, 250 кг/га	30,2	58,9	10,9	1,43	1,12
5	Цеолит, обогащенный аминокислотами, 500 кг/га	24,4	67,2	8,5	2,04	1,11
6	Цеолит, обогащенный карбамидом, 250 кг/га	17,5	55,3	27,2	1,24	1,12
7	Цеолит, обогащенный карбамидом, 500 кг/га	24,2	55,6	20,2	1,25	1,13
8	N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	33,4	51,8	14,8	1,07	1,24

Таблица 2. Агрофизические показатели пахотного слоя чернозема типичного в зависимости от внесения в почву экспериментальных удобрений (0-30 см) под посевами озимой пшеницы

№ п/п	Варианты	Содержание агрегатов, % (сухое просеивание)			Коэффициент структурности	Плотность, г/см ³
		>10 мм	10-0,25 мм	<0,25 мм		
1	Контроль	30,6	59,8	9,6	1,49	1,21
2	Цеолит, 250 кг/га	27,9	63,4	8,7	1,74	1,17
3	Цеолит, 500 кг/га	26,4	64,0	9,7	1,77	1,15
4	Цеолит, обогащенный аминокислотами, 250 кг/га	27,6	65,3	7,1	1,89	1,11
5	Цеолит, обогащенный аминокислотами, 500 кг/га	23,3	69,5	7,2	2,28	1,07
6	Цеолит, обогащенный карбамидом, 250 кг/га	25,2	65,9	8,9	1,94	1,13
7	Цеолит, обогащенный карбамидом, 500 кг/га	25,0	65,9	9,1	1,93	1,14
8	N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	24,2	62,4	13,4	1,66	1,20

Полученные данные свидетельствуют, что количество агрономически ценных агрегатов размерами 0,25-10 мм при применении цеолита, а также удобрения на его основе при обогащении его аминокислотами существенно повышалось: до 9,7 % в агроценозе озимой пшеницы и до 18,6 % в агроценозе сои. При применении цеолита, обогащенного карбамидом структурное состояние почвы, также улучшалось, но в меньшей степени.

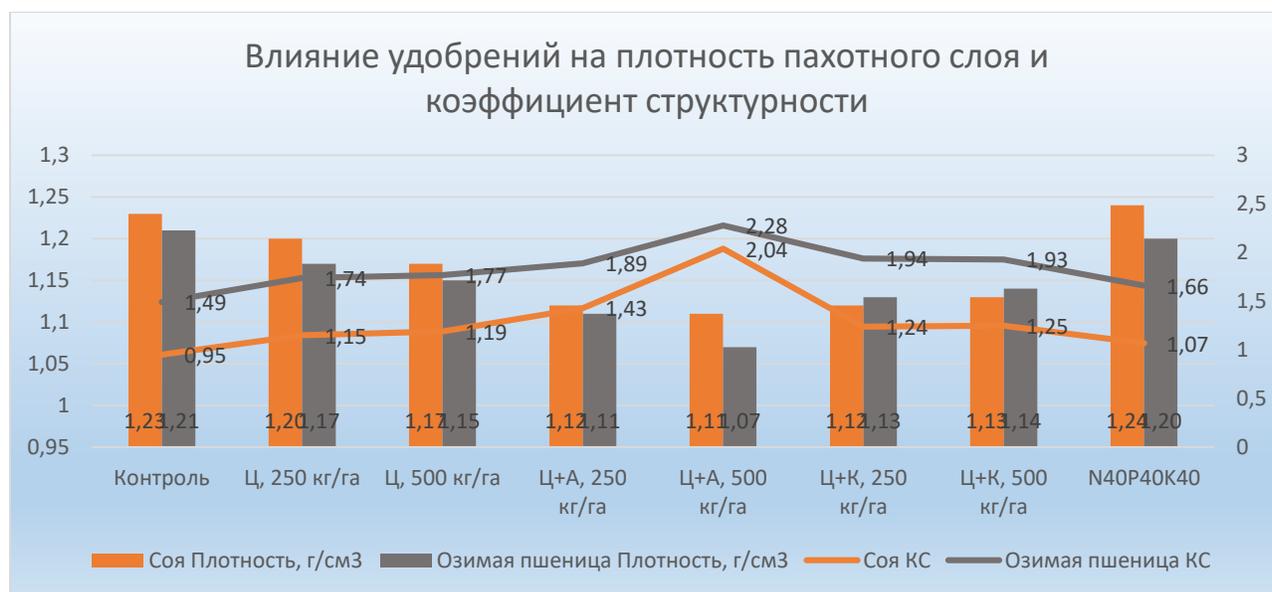


Рис.1. Влияние удобрений на плотность пахотного слоя почвы и коэффициент структурности

При внесении в почву удобрений на основе цеолита ее агрофизическое состояние значительно улучшилось, особенно при использовании дозы 500 кг/га и обогащении аминокислотами, показатели приобрели оптимальные для озимой пшеницы и сои значения: плотность пахотного слоя 1,07 и 1,11 г/см³, коэффициент структурности 2,28 и 2,04 (Рис. 1).

Минеральные удобрения достоверного влияния на структурно-агрегатный состав и плотность почвы пахотного слоя чернозема типичного и чернозема выщелоченного не оказали.

При анализе полученных экспериментальных данных установлена отрицательная связь между плотностью пахотного слоя и коэффициентом структурности (Рис.2). Особенно тесно обратная зависимость прослеживается под посевами озимой пшеницы.

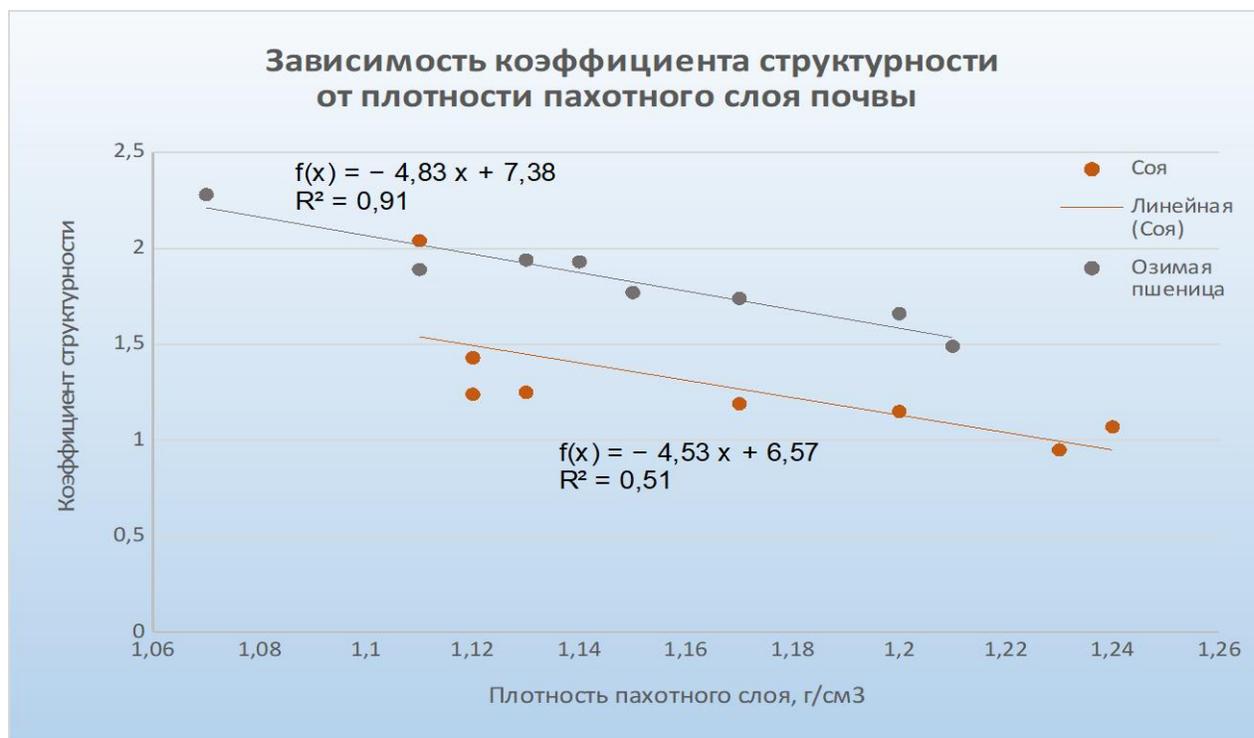


Рис.2. Зависимость коэффициента структурности от плотности пахотного слоя почвы

Таким образом, между коэффициентом структурности и плотностью пахотного слоя почвы установлена отрицательная зависимость, выражаемая уравнениями регрессии:

$$f(x) = -4,83x + 7,38 \quad (R^2 = 0,91)$$

$$f(x) = -4,53x + 6,57 \quad (R^2 = 0,51)$$

Выводы

Цеолит Юшанского месторождения при применении как в чистом виде, так и, особенно, при обогащении его аминокислотами, оказал достоверное положительное влияние на агрофизические показатели пахотного слоя чернозема выщелоченного и чернозема типичного, которые приобрели оптимальные для возделывания сельскохозяйственных культур значения.

При этом количество агрономически ценных агрегатов (0,25-10 мм) увеличилось на 3,6-9,7 % (абсолютные значения), коэффициент структурности повысился с 1,49 на контроле до 1,74-2,28 единиц под посевами озимой пшеницы. Под посевами сои количество агрономически ценных агрегатов увеличилось на 5,7-18,6 %, коэффициент структурности с 0,95 возрос до 1,15-2,04.

Литература

- Долгополова Н. В., Малышева Е. В., Нагорных А. В. (2021) Об агрофизических свойствах почвенного слоя *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. **7**, 18-25.
- Кафтан Ю.В., Зенкова Н.А. (2019) Агрофизические свойства почвы и урожайность сельскохозяйственных культур в севооборотах. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. **3(77)**. 27-30.
- Куликова А.Х., Карпов А.В., Яшин Е.А. (2020) Кремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: Ульяновский ГАУ. 176 с.
- Мамиев, Д. М. (2023) Агрофизические свойства почвы в зависимости от культур травопольного севооборота. *Аграрная наука*. **10**, 84-87.
- Чекаев Н.П., Рябов А.Е., Власова Т.А., Корягин Ю.В. (2019) Изменение агрофизических свойств чернозема выщелоченного в зависимости от применения местных кремнийсодержащих пород и удобрений. *Нива Поволжья*. **4 (53)**. 93-101.
- Cataldo E., Salvi L., Paoli F. (2021) Application of Zeolites in Agriculture and Other Potential. *Agronomy*. **11**, 1547.
- Kulikova A. Kh., Volkova E. S., Yashin E. A. (2023) The yield formation of winter wheat under the influence of fertilization systems using two field experiments as an example. *II International Conference on Current Issues of Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops, and Environment*. **71**, 1053.

УДК 551.312.22:574.4

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКОВ CO₂ С ПОВЕРХНОСТИ ОЛИГОТРОФНОГО БОЛОТА ТЕСТОВОГО ПОЛИГОНА МУХРИНО

Клименко В.С.¹, Исаева А.Н.¹, Куприянова Ю.В.¹, Ниязова А.В.¹, Сиуха А.В.¹,
Ильясов Д.В.¹

¹Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Российская Федерация
v_klimenko@ugrasu.ru, a_isaeva@ugrasu.ru, y_kupriyanova@ugrasu.ru,
a_meshcheryakova@ugrasu.ru, a_siuha@ugrasu.ru, d_ilyasov@ugrasu.ru

SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF CO₂ FLUXES FROM THE SURFACE OF AN OLIGOTROPIC PEATLAND AT THE MUKHRINO TEST SITE

Klimenko V.S.¹, Isaeva A.N.¹, Kupriianova Iu.V.¹, Niyazova A.V.¹, Siuha A.V.¹, Ilyasov D.V.¹
¹Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

Annotation: Temperature and water table level are important environmental factors that influence the spatio-temporal dynamics of carbon dioxide fluxes in peatlands. Temporal changes are more associated with the surface temperature of the peat, while spatial changes correlate with the WTL. To assess spatial variability, NEE and Reco fluxes are considered, and for temporal variability, Rsoil is considered, using only modeling methods.

Введение

Основная причина глобального изменения климата – рост концентрации парниковых газов, важнейшим из которых является диоксид углерода. Его вклад в парниковый эффект, определяющий тепловой баланс планеты, составляет более 50% (IPCC, 2023).

Крупнейшим из резервуаров и естественным поглотителем CO₂ являются ненарушенные болотные экосистемы. Торфяные болота, по разным оценкам, содержат от 450 до 600 Гт углерода (Yu et al., 2010; Сирин, 2022), что составляет около трети мировых запасов почвенного углерода и более половины запасов углерода в атмосфере Земли.

В последнее время особое внимание уделяется вопросам газообмена и углеродного баланса северных торфяников (Bellen, Larivière, 2020; Dyukarev et al., 2021; Yang et al., 2023; Golovatskaya et al., 2024). В России в рамках Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Российская система климатического мониторинга» (РСКМ) (Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2022г. № 3240-р; Shirov, 2023) Консорциумом «Углерод в экосистемах» (Российские инновационные технологии мониторинга углерода (РИТМ углерода. 2024. URL:<https://ritm-c.ru/>) реализуется разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на

территории Российской Федерации, создание системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах, в том числе болотных.

Западная Сибирь площадью около 3 млн км² (Помус, 1956) является одним из самых заболоченных регионов мира с долей болот около 50% (Терентьева и др., 2021), которые, в свою очередь, содержат от 55 (Ефремов, Ефремова, 2007) до 70 Пг (Sheng et al., 2004) углерода.

Натурное изучение потоков диоксида углерода в силу разных причин часто ограничено отдельными компонентами баланса CO₂, такими как, нетто-экосистемный обмен (NEE), дыхание почвы (R_{soil}), экосистемное дыхание (R_{eco}) и/или временными рамками (разовые или непродолжительные измерения из-за организационных и технических сложностей, а также удаленности объектов исследований) (Ильясов и др., 2020).

Природное разнообразие болот (тип питания, растительный покров) и их сложная пространственная структура (в которую входят болотные массивы, болотные фации, элементы фации и другие более мелкие структуры) определяют существенные различия в проявлении их климаторегулирующих функций. Пространственная вариабельность усиливается временными вариациями потока, включая сезонные и межгодовые. Поэтому оценка величин потоков CO₂ желательна с учетом ландшафтных единиц болота и их временного хода.

Таким образом, **целью** данного исследования явилась оценка пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ с поверхности олиготрофного болота тестового полигона Мухрино.

Объекты и методы

Район исследования

Район исследования расположен в центральной части Западной Сибири в среднетаежной биогеографической зоне на территории международной полевой станции «Мухрино» (координаты 60°53'20" с.ш., 68°42'10" в.д.) в 30 км к юго-западу от города Ханты-Мансийска на левобережной террасе Иртыша вблизи одного из типичных болотных массивов (болото «Мухрино») на северо-восточной границе Кондинской низменности, где болота покрывают более 50% территории (рис. 1 а-в; Кургiianova et al., 2022).

В рамках одной из задач по проектированию сети наземных тестовых полигонов на национальном уровне Консорциума «Углерод в экосистемах» ВИП ГЗ РКСМ болотный массив «Мухрино» (рис. 1 г) был выбран первой для болотных экосистем и одной из четырех (на территории России) тестовых площадок интенсивного уровня 1 типа для осуществления комплексных исследований по оценке пулов углерода и потоков парниковых газов.

Объекты

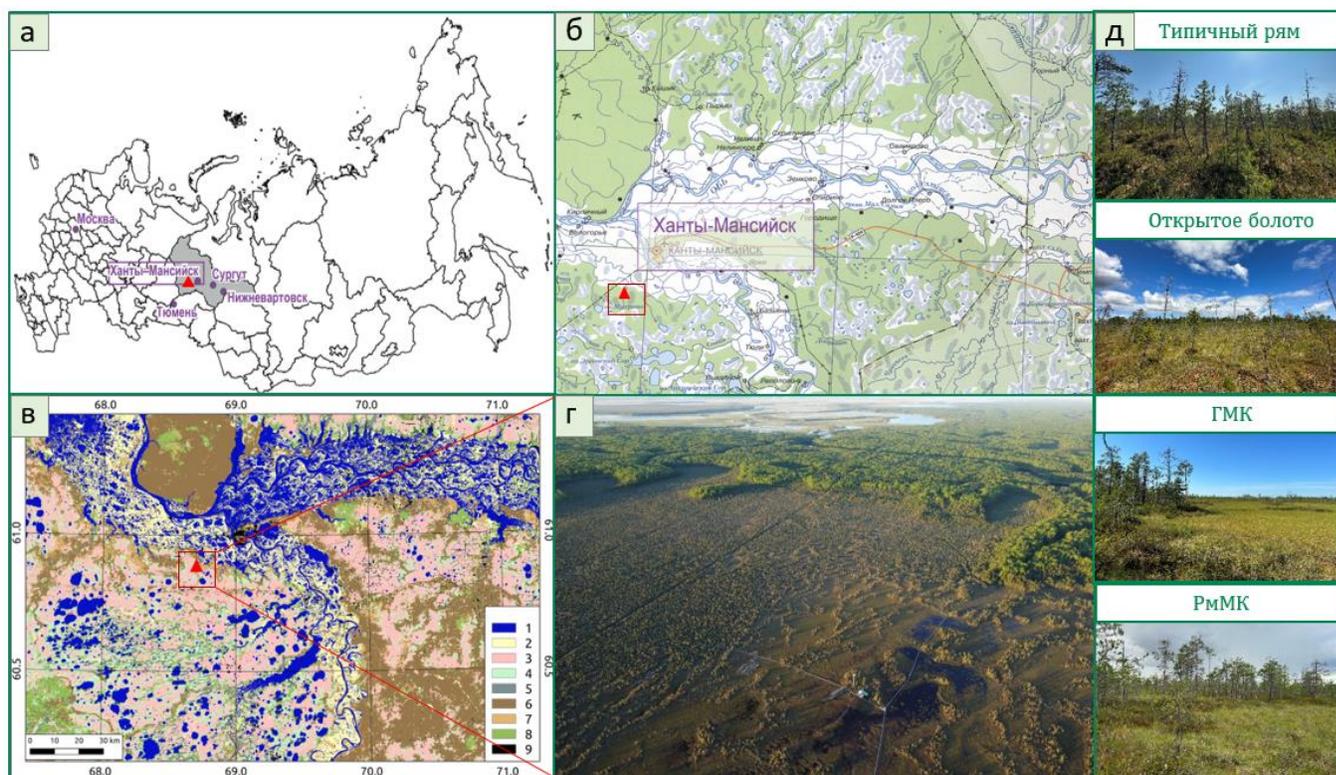


Рис. 1. Географическое положение международной полевой станции Мухрино: а – на карте субъектов России; б – на топографической карте в пределах окрестностей Ханты-Мансийска; в – на классифицированном снимке Landsat-5 с типологической легендой (1 – водные объекты; 2 – пойма; 3 – грядово-мочажинный комплекс; 4 – рям; 5 – сосновый лес; 6 – смешанный лес; 7 – лиственный лес; 8 – нарушенный лес; 9 – инфраструктура); г – фотография болотного массива «Мухрино»; д – основные фации болотного полигона «Мухрино» (Kurpianova et al., 2022).

В пределах тестового полигона «Мухрино» объектами выбраны типичные для средней тайги Западной Сибири мозаичные и комплексные болотные фации, хорошо выраженные по занимаемой площади и представленные 2-5 постоянными пробными площадями (рис. 1 д; Kurpianova et al., 2022). Далее рассмотрим их детальнее:

А. Гомогенного строения с мозаичной пространственной структурой;

1. «Рям»: типичный рям (ТР) с *Pinus sylvestris* (0.5–4 м высотой), *Ledum palustris*, *Chamaedaphne calyculata* и *Sphagnum fuscum*, омбротрофными карликовыми кустарниками и сфагновыми кочками, поросшими соснами.

2. «Открытое болото» (ОБ) – сфагновое болото с редкими низкими соснами с *Pinus sylvestris*, *Chamaedaphne calyculata*, *Eriophorum vaginatum*, *Sphagnum angustifolium* и *Sph. divinum*.

Б. Гетерогенного (комплексного) строения;

1. Грядово-мочажинный комплекс (ГМК) – наиболее распространенный комплекс болот олиготрофного типа в Западной Сибири.

1а. «Гряда»: Сфагновые гряды с *Pinus sylvestris*, *Ledum palustris*, *Chamaedaphne calyculata* и *Sphagnum fuscum*. Высота сосен обычно составляет 0.5-2.0 м при покрытии 3–10%.

1б. «Мочажина шейхцериевая»: мочажины, занятые *Scheuchzeria palustris*, моховой покров представлен *Sph. Papillosum*, *Sph. Jensenii*, *Sph. Majus* и *Sph. Lindbergii*.

2. Рямово-мелко-мочажинный комплекс (далее РмМК)

2а. «Гряда»: Сфагновые гряды с *Pinus sylvestris*, *Ledum palustris*, *Chamaedaphne calyculata* и *Sphagnum fuscum*. Высота сосен обычно составляет 0.5-2.0 м при покрытии 3–10%.

2б. «Мочажина пушицевая»: мочажины, занятые *Eriophorum vaginatum* L; моховой покров представлен *Sph. Papillosum*, *Sph. Jensenii*, *Sph. Majus* и *Sph. Lindbergii*.

Методы

Измерения осуществлялись статическим камерным методом. В исследуемых точках в почвенный покров с помощью зубчатой пилы, вровень с его поверхностью врезались основания измерительных камер из нержавеющей стали высотой 15 см. В желоб основания сразу после установки заливалась вода для обеспечения герметичности процесса измерения. Измерения велись последовательно на пяти-восьми установленных в разных элементах фации (гряды и мочажины) и элементах мозаики (кочки и межкочья гряд, микропонижения и микроповышения мочажин) основаниях в трех-четырёхкратной аналитической повторности в мае, июле и сентябре.

Для организации натуральных измерений потоков углекислого газа использовалась мобильная система измерения в составе: портативный газоанализатор CO₂/H₂O/CH₄ LI-7810, камера со снимаемым темным чехлом, планшет с доступом к веб-серверу, отображающему текущие результаты измерений.

Дыхание экосистемы (R_{eco}), которое является суммой почвенного дыхания (R_{soil} – совокупное дыхание корней растений (R_{root}) и почвенных микроорганизмов (R_h)) и дыхания надземных частей растений (R_{plant}), измеряли на площадках с ненарушенной растительностью темной камерой (искусственно заданное ночное время), когда фотосинтетическая активность растений отсутствует. Нетто-экосистемный обмен (N_{EE}), или чистый обмен диоксида углерода между экосистемой и атмосферой, измеряли на тех же площадках, что и R_{eco} (ненарушенная растительность), но прозрачной камерой в дневное время суток при фотосинтетической активности растений. N_{EE} является суммой двух противоположно направленных процессов: эмиссии диоксида углерода экосистемой

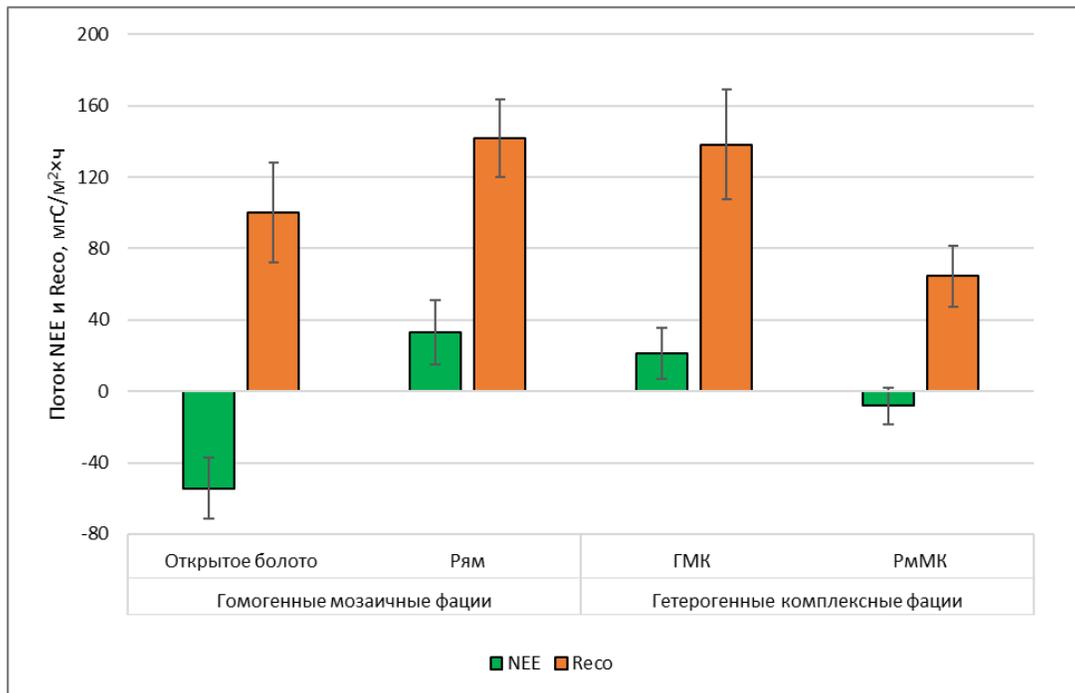
в атмосферу (R_{eco}) и поглощения диоксида углерода экосистемой из атмосферы (валовый фотосинтез растений – GEE). Результаты измерений обрабатывались с использованием пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений Matlab.

Для оценки пространственной изменчивости рассматривали потоки NEE и R_{eco} , поскольку их измерение не подразумевает нарушение целостности почвенного покрова, который важно сохранить на постоянных пробных площадях тестового полигона. Получение временного хода потоков CO_2 в силу некоторых особенностей (точечные данные во времени, пропуски в рядах измерений) подразумевает использование методов математического моделирования. Моделирование NEE и R_{eco} осложняется изменчивостью сразу нескольких параметров (растительный покров, ФАР, температура, УБВ и т.д.) (Rankin et al., 2022), что вносит погрешности смоделированных значений как в большую, так и в меньшую сторону (Huth et al., 2017). В то время как Rsoil имеет достоверную зависимость от УБВ при наличии долговременного временного хода наблюдений (Plyasov et al., 2023). Поэтому для оценки временной изменчивости нами был выбран именно этот компонент баланса CO_2 . Используя регрессионную модель связи почвенного дыхания с УБВ, полученную на основе массива данных за 2021-2022 гг. (Plyasov et al., 2023), мы смоделировали сезонные значения $R_{\text{soil}}(\text{кум.})$ за 2023 год.

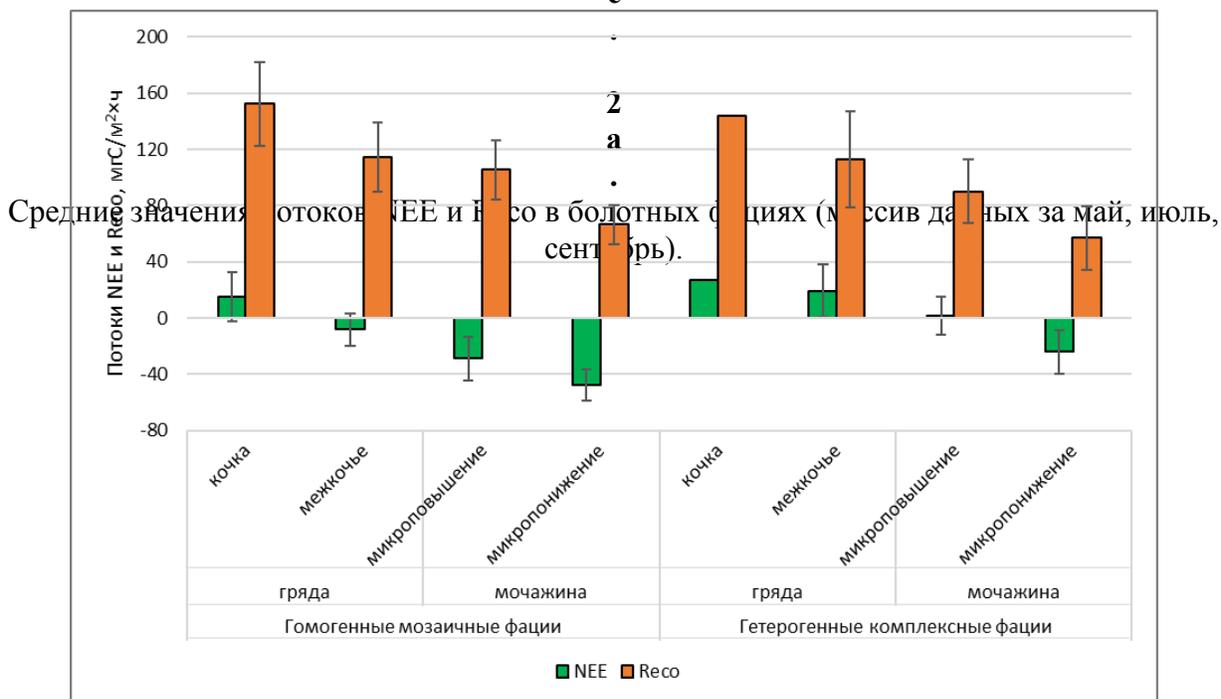
Результаты и обсуждение

Пространственная изменчивость NEE и R_{eco}

Наибольшее значение NEE (выделение) наблюдается в типичном ряме ($33 \text{ мгС/м}^2 \times \text{час}$), наименьшее (поглощение) в открытом болоте ($-54 \text{ мгС/м}^2 \times \text{час}$). В типичном ряме также отмечено наибольшее значение R_{eco} ($138 \text{ мгС/м}^2 \times \text{час}$), наименьшее в РмМК – ($64 \text{ мгС/м}^2 \times \text{час}$) (рис. 2а). Четкая закономерность потоков отмечена по элементам мозаики: от кочки к микропонижению наблюдается снижение дыхания (R_{eco}) и повышение поглощения (NEE) во всех типах болотных фаций (рис. 2б). Такие закономерности, предположительно, связаны сразу с несколькими факторами – УБВ и температура. Когда уровень болотных вод падает, аэрация почвы увеличивается, обеспечивая более эффективное аэробное окисление, а более высокие температуры воздуха и почвы стимулируют микробную активность, что приводит к увеличению эмиссии CO_2 из почв в повышенных элементах микрорельефа. Полученные нами данные хорошо согласуются с литературными (Mäkiranta et al., 2009; Sulman et al., 2009; Acosta et al., 2017).



Р
и
с



Р
и
с

Временная изменчивость R_{soil} (кумулятив.)

Во всех болотных фациях кумулятивное сезонное почвенное дыхание линейно растет от июля к сентябрю (рис. 3а, 3б). К концу вегетационного сезона разница в кумулятивных значениях потоков между фациями гомогенного мозаичного строения (ТР и ОБ) составила 30% (рис. 3а); в болотных фациях гетерогенного комплексного строения (ГМК и РММК) разница между грядами составила 8% (ГМК – 344 и РММК – 318 гС/(м² сезон)), между мочажинами 10% (ГМК – 135 и РММК – 149 гС/(м² сезон)) (рис. 3б). Значения дыхания почв гомогенных объектов практически совпадет с более сухими элементами (грядами) гетерогенных участков (рис. 3а, 3б); потоки в мочажинах (более увлажненных участках) имеют небольшие различия в значениях (рис. 3б).

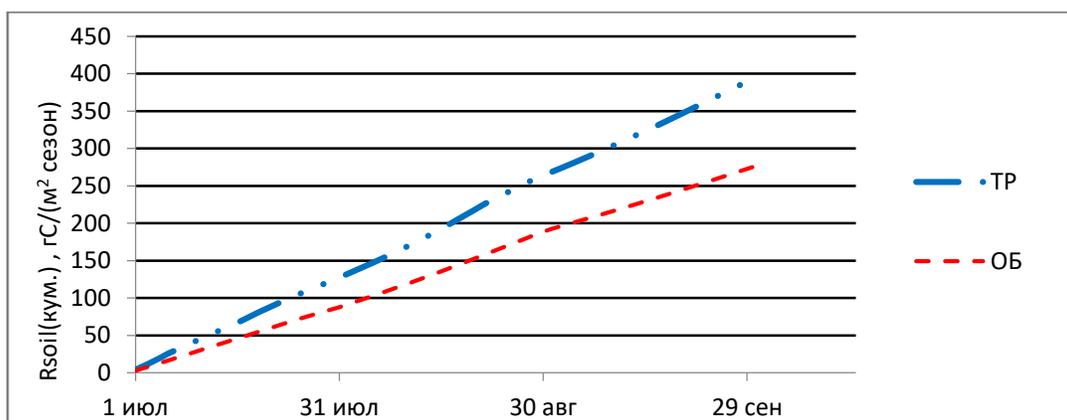


Рис. 3а. Сезонная динамика почвенного дыхания в болотных фациях гомогенного мозаичного строения.

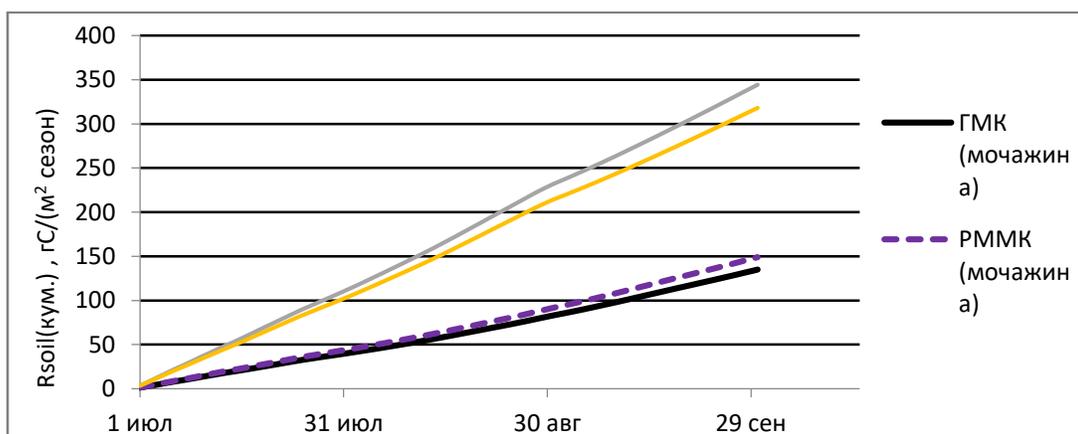


Рис. 3б. Сезонная динамика почвенного дыхания в болотных фациях гетерогенного комплексного строения.

Медиана кумулятивного почвенного дыхания возрастала в ряду: мочажина ГМК, мочажина РмМК, открытое болото (грядка и мочажина), грядка РмМК, грядка ГМК, типичный рям (рис. 3в). Наименьшее кумулятивное почвенное дыхание отмечено на более увлажненных участках: мочажины ГМК и РмМК; наибольшее – на участках гряды ГМК и типичного ряма. Предположительно, разница в значениях связана, в первую очередь, с УБВ, а также особенностями растительного покрова и ландшафтного строения.

Пунктирной линией на рис. 3в показаны значения измерений за 2021 и 2022 годы, что позволяет оценить не только сезонную, но межгодовую динамику кумулятивного почвенного дыхания. Отметим, что полученные нами значения за 2023 год практически не отличаются от значений прошлых лет, а также согласуются с литературными данными (Dimitrov et al., 2010; Alekseychik et al., 2017; Dyukarev et al., 2021), однако скачок показателя в типичном ряме за 2022 год может быть обусловлено с недостаточными условиями увлажнения, связанными с кратковременным засушливым периодом.

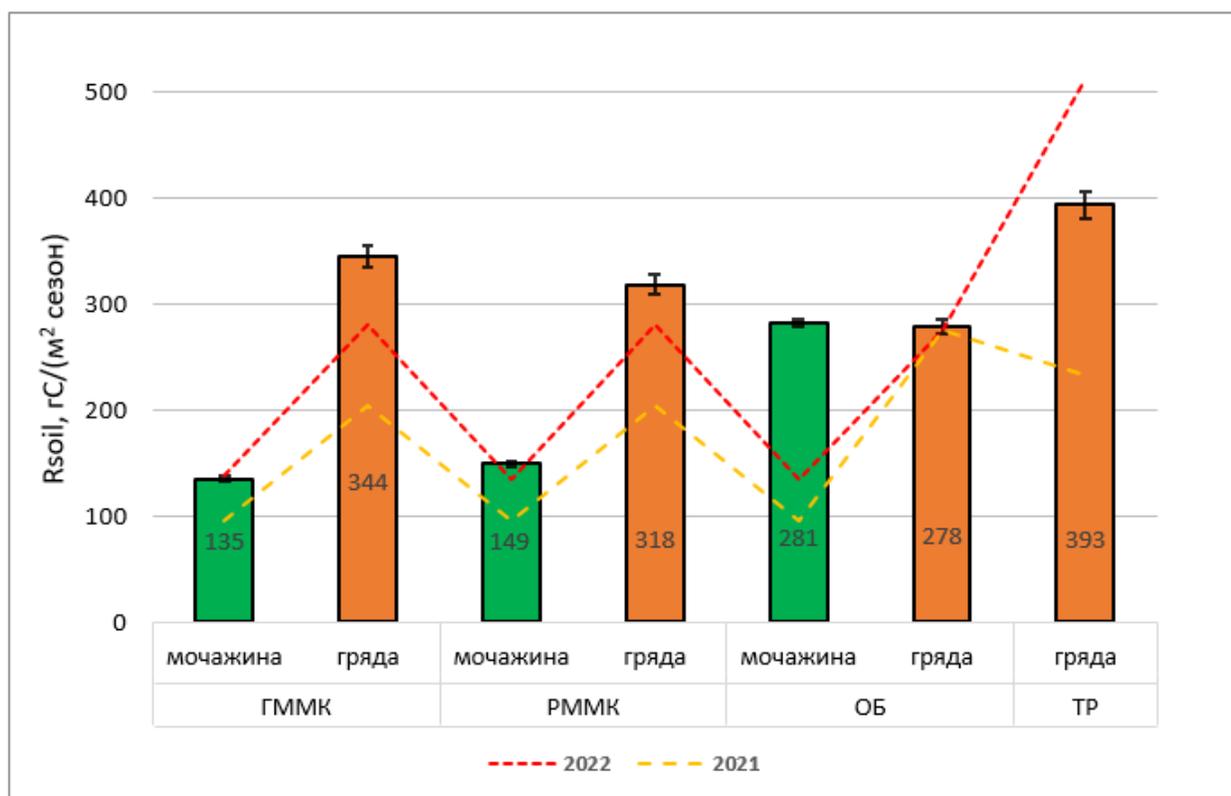


Рис. 3в. Межгодовая динамика кумулятивного почвенного дыхания в болотных фациях с учетом их элементов (грядка и мочажина). Пунктирная линия - динамика средних значений за 2021-2022 гг.; столбцы - средние значения за 2023 год.

Выводы

NEE и Reso на типологически различных участках болотного массива Мухрино варьировали в пределах от -54 до 33 и от 64 до 138 мгС/м²×час соответственно. Внутрисезонная изменчивость Rsoil была незначительной и в первую очередь определялась возникновением экстремально засушливых периодов. Межгодовая изменчивость Rsoil составила 30–40% как в грядках, так и в мочажинах, за исключением участка гряд типичного ряма, где она достигла 200%. Оценка пространственно-временной изменчивости компонентов углеродного цикла в болотных экосистемах важна для понимания механизмов, лежащих в его основе формирования их углеродного баланса.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по организации молодежной лаборатории в Югорском государственном университете (НИР 1022031100003-5-1.5.1) в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты».

Литература

- Ефремов С.П., Ефремова Т.Т. (2007) Экспериментальная диагностика торфонакопления и трансформации органического вещества в лесоболотных экосистемах Западной Сибири. *Мат-лы Второго между нар. полевого симп.: Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее*. Томск: Издво НТЛ, 95-97.
- Ильясов Д. В., Молчанов А. Г., Глаголев М. В., Суворов Г. Г., Сирин А. А. (2020) Моделирование нетто-экосистемного обмена диоксида углерода сенокоса на осушенной торфяной почве: анализ сценариев использования. *Компьютерные исследования и моделирование*, **12(6)**, 1427-1449. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-6-1427-1449>.
- Помус М. И. (1956) Западная Сибирь (экономико-географическая характеристика). М.: Государственное издательство географической литературы, **119**, 643.
- Сирин А. А. (2022) Болота и антропогенно-измененных торфяники: углерод, парниковые газы, изменение климата. *Успехи современной биологии*, **142(6)**, 560-577. <https://doi.org/10.31857/S258755662304012X>.
- Терентьева И. Е., Филиппов И. В., Сабреков А. Ф., Глаголев М. В., Курбатова Ю. А., Максютов Ш. (2021) Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, **84(6)**, 920-930. <https://doi.org/10.31857/S2587556620060102>.
- Широв А.А. (2023) Создание системы мониторинга и прогнозирования выбросов климатически активных веществ в интересах модернизации и развития экономики

- России. *Проблемы прогнозирования*, **6**, 11-24. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-201-11-24>.
- Acosta M., Juszczak R., Chojnicki B., Pavelka M., Havránková K., Lesny J., Olejnik J. (2017). CO₂ fluxes from different vegetation communities on a peatland ecosystem. *Wetlands*, **37**, 423-435. <https://doi.org/10.1007/s13157-017-0878-4>.
- Alekseychik P., Mammarella I., Karpov D., Dengel S., Terentieva I., Sabrekov A., Lapshina E. (2017) Net ecosystem exchange and energy fluxes measured with the eddy covariance technique in a western Siberian bog. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **17(15)**, 9333-9345. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9333-2017>.
- Bellen van S., Larivière V. (2020) The ecosystem of peatland research: a bibliometric analysis. *Mires and peat*, **26**. <https://doi.org/10.19189/MaP.2020.RSC.StA.1977>.
- Dimitrov D. D., Grant R. F., Lafleur P. M., Humphreys E. R. (2010). Modeling the effects of hydrology on ecosystem respiration at Mer Bleue bog. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **115(G4)**, G04043. <https://doi.org/10.1029/2010JG001312>.
- Dyukarev E., Zarov E., Alekseychik P., Nijp J., Filippova N., Mammarella I., Lapshina E. (2021) The multiscale monitoring of peatland ecosystem carbon cycling in the middle taiga zone of Western Siberia: The Mukhrino bog case study. *Land*, **10(8)**, 824. <https://doi.org/10.3390/land10080824>.
- Golovatskaya E. A., Veretennikova E. E., Dyukarev E. A. (2024) Greenhouse Gas Fluxes and Carbon Sequestration in the Oligotrophic Peat Soils of Southern Taiga in Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, **57(2)**, 210-219. <https://doi.org/10.1134/S1064229323602871>.
- Huth V., Vaidya S., Hoffmann M., Jurisch N., Günther A., Gundlach L., Augustin J. (2017). Divergent NEE balances from manual-chamber CO₂ fluxes linked to different measurement and gap-filling strategies: A source for uncertainty of estimated terrestrial C sources and sinks? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **180(3)**, 302-315. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600493>.
- Ilyasov D. V., Meshcheryakova A. V., Glagolev M. V., Kupriianova I. V., Kaverin A. A., Sabrekov A. F., Lapshina E. D. (2023) Field-Layer Vegetation and Water Table Level as a Proxy of CO₂ Exchange in the West Siberian Boreal Bog. *Land*, **12(3)**, 566. <https://doi.org/10.3390/land12030566>.
- IPCC. (2023) Synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6), Longer report, 85. https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
- Kupriianova I.V., Kaverin A.A., Filippov I.V., Ilyasov D.V., Lapshina E.D., Logunova E.V., Kulyabin M.F. (2022) The main physical and geographical characteristics of the Mukhrino field station area and its surroundings. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, **13(4)**, 215-252. <https://doi.org/10.18822/edgcc240049>.
- Mäkiranta P., Laiho R., Fritze H., Hytönen J., Laine J., Minkkinen K. (2009) Indirect regulation of heterotrophic peat soil respiration by water level via microbial community

- structure and temperature sensitivity. *Soil Biology and Biochemistry*, **41(4)**, 695-703. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.01.004>.
- Rankin T. E., Roulet N. T., Moore T. R. (2022). Controls on autotrophic and heterotrophic respiration in an ombrotrophic bog. *Biogeosciences*, **19(13)**, 3285-3303. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3285-2022>.
- Sheng Y., Smith L. C., MacDonald G. M., Kremenetski K. V., Frey K. E., Velichko A. A., Dubinin P. (2004) A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool. *Global Biogeochemical Cycles*, **18(3)**. <https://doi.org/10.1029/2003GB002190>.
- Sulman B. N., Desai A. R., Cook B. D., Saliendra N., Mackay D. S. (2009) Contrasting carbon dioxide fluxes between a drying shrub wetland in Northern Wisconsin, USA, and nearby forests. *Biogeosciences*, **6(6)**, 1115-1126. <https://doi.org/10.5194/bg-6-1115-2009>.
- Yang H., Chae J., Yang A. R., Suwignyo R. A., Choi E. (2023) Trends of Peatland Research Based on Topic Modeling: Toward Sustainable Management under Climate Change. *Forests*, **14(9)**, 1818. <https://doi.org/10.3390/f14091818>.
- Yu Z., Loisel J., Brosseau D. P., Beilman D. W., Hunt S. J. (2010) Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L13402. [doi:10.1029/2010GL043584](https://doi.org/10.1029/2010GL043584).

УДК 634.8

МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КАК МАРКЕРЫ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕОАРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ

Сидорова И.Я., Ковалева Н.О.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

yaroslavovna1999@yandex.ru

Аннотация: В статье представлены результаты исследования земляной конструкции Острогжского вала Белгородской оборонительной черты (Воронежская область). Почвенный покров изученных ландшафтов представлен черноземами карбонатными, дерново-карбонатными и серыми лесными почвами. С помощью таких почвенных маркеров, как магнитная восприимчивость и электропроводность выявлены технологические особенности строительства вала.

MAGNETIC SUSCEPTIVITY AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY AS MARKERS OF DESIGN FEATURES OF GEOARCHEOLOGICAL MONUMENTS

Sidorova I.Y., Kovaleva N.O.

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: The article presents the results of a study of the construction of the Ostrogozhsky rampart of the Belgorod defensive line (Voronezh region). The soil cover of the studied landscapes is carbonate chernozems, sod-carbonate and gray forest soils. Using soil markers such as magnetic susceptibility and electrical conductivity, the technological features of the shaft construction.

Введение

Белгородская черта – одна из самых мощных и сложных линейных укреплений, созданных на границах Московского государства в XVI–XVII вв. Имея протяженность около 800 км, она начиналась у р. Челновая (приток Цны) и заканчивалась на р. Ворскла (приток Днепра), русско-польской границе того времени. С 30-х по 50-е гг. XVII в. на путях вторжений крымских и ногайских татар была возведена линия укреплений, включавшая в себя города-крепости, стоялые и жилые острожки, земляные городки, валы со рвами, частоколы, надолбы, засеки. Оборонительная черта включала также такие естественные природные препятствия как реки, леса и болота. В свою очередь, засечные черты и входящие в их состав фортификационные сооружения выполняли функции трасс освоения: вдоль них возникали города и села, интенсивно распахивались земли. В настоящее время ведется активное изучение и описание, а также музеефикация

археологических объектов вдоль Белгородской оборонительной черты группой археологов под руководством А.Н. Голотвина (Голотвин и др., 2023).

Изучение погребенных почв и культурных слоев земляных конструкций геоархеологических памятников необходимо для составления достоверной картины изменений климата и природной среды лесостепной зоны в историческое время, а также для изучения технологий земляного строительства на исследованной территории. Почва – самостоятельное естественно-историческое тело, которое не только отражает действие почвообразующих факторов в данный момент времени, но и сохраняет в своем теле отдельные признаки, отражающие влияние этих факторов, на долгое время. Расшифровка таких признаков приводит к пониманию вопросов происхождения и эволюции почв, и истории динамики природной среды. Проблема изучения эволюции почв региона осложняется длительным антропогенным воздействием на почвенный покров и ландшафты, в результате чего на больших площадях появляются антропогенно-модифицированные почвы и экосистемы, существенно отличающиеся от естественных. В связи с этим появляется необходимость комплексного анализа результатов воздействий природных и антропогенных факторов на эволюцию почв и экосистему в целом.

Объекты и методы

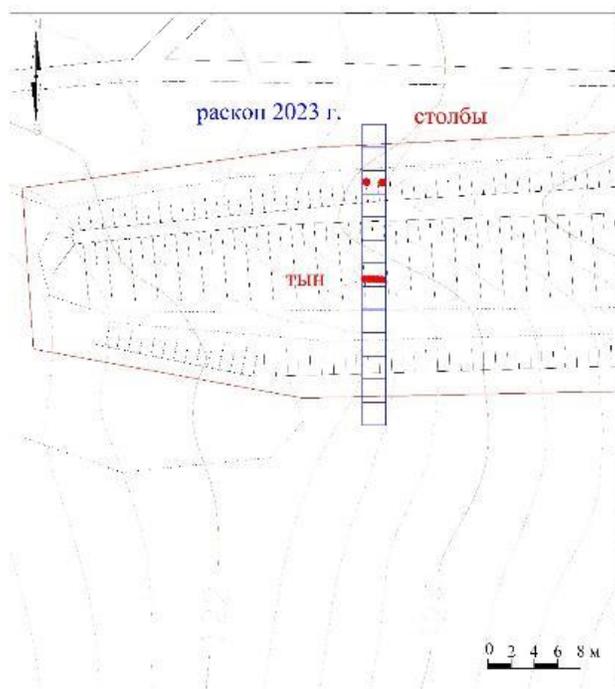


Рис. 1. Схема археологического раскопа Острогжского вала.

Объектами исследования послужили фортификационные сооружения и погребенные под ними почвы лесостепной зоны Восточно-Европейской равнины, а

именно Острогожский вал (Воронежская область), система рвов с внутренней и внешней от вала стороны (рис. 1).

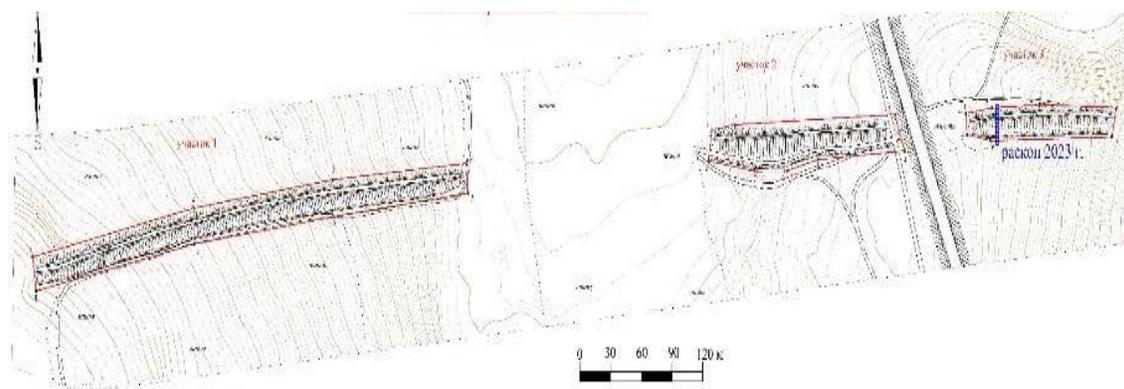


Рис. 2. Топографическая карта Острогожского вала.

Участок 1 находится на склоне правого невысокого берега, плавно переходящего в коренной. Он расположен на высоте от 2 м до 38 м от уровня реки. Участок 1 вытянут по линии запад-восток, на расстояние около 424 м. Вал имеет ширину от 6 м до 14 м, высоту до 2,5 м. Ров расположен с напольной стороны. Его ширина составила от 2 до 5 м, глубина – до 1,2 м. Участок 1 отделен от участков 2 и 3 долиной р. Острогоща и заканчивается в лесном массиве (Урочище Гнилушка). Граница территории участка представляет собой вытянутый многоугольник. Общий периметр границы территории участка 1 составляет 900,03 м, а площадь – 9916,48 кв. м. В восточной части участка 1 вал наиболее хорошо сохранился. Высота насыпи от уровня дневной поверхности до 1 м, от дна рва – 1 м. Ширина насыпи вала по дневной поверхности около 15 м. Ширина гребня – до 5 м. Крутизна склона с южной стороны – 10°, с северной стороны – около 8°. Ров читается с южной стороны в виде небольшого понижения, имеет ширину по верху около 10 м, глубиной до 0,5 м. Крутизна южного склона – 5°. Берма отсутствует.

Участок 2 расположен на склоне левого невысокого берега, плавно переходящего в коренной. Он расположен на высоте от 1,5 м до 10 м от уровня реки. Участок 2 вытянут по линии запад-восток, на расстояние около 183 м. Вал имеет ширину от 10 м до 20 м и высоту до 2 м. Ров расположен с напольной стороны. Его ширина составила от 5 до 8 м, глубина – до 1,2 м. Участок 2 отделен от участка 1 долиной р. Острогоща, а от участка 3 – проездом (автодорогой Острогожск–Терновое). Граница территории участка представляет собой вытянутый многоугольник. Общий периметр границы территории участка 2 составляет 419,19 м, а площадь – 5125,73 кв. м. В западной части участка 2 вал наиболее хорошо сохранился. Высота насыпи от уровня дневной поверхности с северной стороны до

0,5 м, от дна рва с южной стороны – 2,1 м. Ширина насыпи вала по дневной поверхности около 15 м. Ширина гребня – до 2 м. Крутизна склона с южной стороны – 11° , с северной стороны – около 8° . Ров читается с южной стороны в виде небольшого понижения, имеет ширину по верху около 7 м, глубиной до 0,2 м. Крутизна южного склона – 3° . Берма отсутствует.

Участок 3 расположен на склоне левого коренного берега и части плато. Он расположен на высоте от 12 м до 30 м от уровня реки. Участок 3 вытянут по линии запад-восток. Вал зафиксирован шириной от 7 м до 14 м и высотой до 1,8 м. Ров расположен с напольной стороны. Его ширина составила от 3 до 8 м, глубина – до 1 м. Участок 3 отделен от участка 2 – проездом (автодорогой Острогжск–Терновое), а заканчивается в лесном массиве (Лес Большой). Граница территории участка представляет собой вытянутый многоугольник. Общий периметр границы территории участка 3 составляет 323,14 м, а площадь – 3023,44 кв. м. В центральной части участка 3 вал наиболее хорошо сохранился. Высота насыпи от уровня дневной поверхности с северной стороны до 2,2 м, от дна рва с южной – 1,15 м. Ширина насыпи вала по дневной поверхности около 15 м. Ширина гребня – до 5 м. Крутизна склона с южной стороны – 11° , с северной стороны – около 12° . Ров читается с южной стороны в виде небольшого понижения, имеет ширину по верху около 4 м, глубиной до 0,2 м. Крутизна южного склона – 7° . Берма отсутствует.

Цель работы – выявление технологических приемов, использованных при строительстве Белгородской оборонительной черты в XVI–XVII вв. на основе изучения земляных конструкций и погребенных под ними хронорядов черноземных почв.

Основным методом для изучения погребенных почв послужил метод хронорядов, когда из почв, погребенных под разновременными конструкциями составляется хроноряд, который дает возможность установить направленность изменчивости почвенных свойств во времени и провести палеоклиматические реконструкции на основе сравнительного анализа палеопочв между собой и с современными почвами. Морфологические характеристики фоновых, погребенных почв и материалов земляных конструкций были рассмотрены на макро- и микроуровнях. При изучении геоархеологического сооружения использовалась методика, предложенная Сверчковой (2023), когда каждый памятник рассматривается как целостная система «земляные конструкции - почвы» для различных археологических культур и длительностей хроноинтервалов по единой методике.

В рамках комплексного подхода к изучению свойств почв и земляных конструкций был выполнен спектр физико-химических анализов, также выполнен изотопный анализ. Все объекты датированы археологическим методом. В полевых условиях выполнена топографическая съемка объекта методом геометрического нивелирования.

Фоновые почвы представляют собой агрочерноземы карбонатные и дерново-карбонатные почвы на мело-мергелиевых отложениях, а также серые лесные почвы под ясенево-дубовыми лесами. Хронокатена почв состоит, таким образом, из фонового агрочернозема на второй террасе реки Острогоша, темно-серой лесной почвы под пологом дубового леса на водоразделе, погребенного в 1632 г. чернозема под насыпью вала, стратоземов разной мощности на валу, а также чернозема гидрометаморфизированного в днище рва.

Методы исследования включали определение рН водной суспензии потенциометрически, определение содержания органического углерода (после фумигирования карбонатов кислотой) и азота с помощью сухого сжигания на элементном CNS-анализаторе, определение магнитной восприимчивости полевым каппаметром КТ-5, гранулометрического состава – методом Качинского, электропроводности в почвенных пастах, доведенных о нижнего предела пластичности, – прибором LandMapper – 03/04. Состав стабильных изотопов углерода определен на изотопном анализаторе Termo-Finnigan Delta V Plus после предварительного фумигирования карбонатов.

Все определения выполнены в трехкратной повторности, статистическая обработка результатов осуществлялась с использованием программ STATISTICA 20.

Результаты и обсуждение

Морфологический анализ конструкций земляного вала обнаружил, что памятник сооружен из местных материалов способом послойного ленточного укрепления - «глинобита». В конструкции вала чередуются слои известковой породы (мел, мергель), слои дернины с разным содержанием и разной степенью сохранности корней, а также грунтов разного гранулометрического состава, щебнистости и плотности. При этом чередуются слои среднего и тяжелого суглинка и глины, щебнистость в них варьирует от 10 до 100 % (табл. 1). Инженерные особенности конструкции вала обнаруживают использование таких строительных приемов как использование речного ила глинистого гранулометрического состава, карбонатов и гипса для укрепления слоев земляного сооружения. О речном происхождении ила можно судить по максимально облегченным величинам изотопного отношения для органического углерода – до – 40 ‰ (табл. 2). Содержание и профильное распределение щебня, карбонатов и органического углерода диагностируют 4 гумусированных слоя в конструкции сооружения помимо гумусового горизонта погребенной почвы и 4 слоя породы с повышенным содержанием щебня.

Таблица 1. Морфологические свойства почв и культурных слоев

Горизонт	Средняя глубина, см	Цвет по Манселу	Гран. состав	Корни, %	Щебень, %
Разрез 1 (основание вала, «русская сторона»)					
Ad (0-10)	5	10 YR 3/2	тс*	45	40
A (10-40)	25	10 YR 4/1	сс	30	50
C (40-50)	45	5 YR 8/1	сс	0	0
Разрез 2 (середина склона вала, «русская сторона»)					
Ad (0-10)	5	10 YR 6/1	гл	50	75
C (10-20)	15	10 YR 5/1	гл	1	10
Ab (20-40)	30	10 YR 3/2	тс	10	25
ABv (40-50)	45	10 YR 4/1	сс	1	40
Разрез 3 (центральная часть вала)					
A (0-14)	7	10 YR 5/2	тс	80	10
AB1 (14-33)	25	10 YR 6/1	гл	45	55
A1 (33-50)	41	10 YR 5/2	сс	90	20
AB2 (50-60)	55	10 YR 5/1	сс	40	50
A2 (80-90)	85	7,5YR 5/2	гл	50	15
AB3 (90-100)	95	7,5YR 6/2	тс	1	75
A3 (110-120)	115	7,5YR 4/2	сс	80	35
AB4 (120-140)	125	7,5YR 6/2	тс	1	85
Ab (140-155)	147	7,5YR 2/0	тс	10	10
AB (155-170)	162	7,5YR 6/3	тс	1	35
BC (175-195)	180	7,5YR 8/3	сс	0	70
C (195-200)	197.5				
Разрез 4 (основание вала со стороны «дикого поля»)					
0-10	5	10 YR 5/1	тс	20	40
20-30	25	10 YR 3/1	гл	20	50
Разрез 5 (ров со стороны «дикого поля»)					
12-28	20	10 YR 6/1	гл	70	10
A (28-70)	49	10 YR 5/1	гл	80	7
A (70-95)	83	7,5YR 3/2	гл	50	25
95-130	113	10 YR 5/2	гл	1	80
Разрез 6 (фон, агрочернозем)					
Ap (0-30)	15	7,5YR 3/2	гл	40	50
AB (30-60)	45	7,5YR 5/3	тс	30	80
BC (60-70)	65	7,5YR 7/3	сс	1	90
C (70-80)	75	7,5YR 8/0	сс	0	100

Разрез 7 (фон, темно-серая лесная почва, дубовый лес)					
АО (0-5)	3	7,5YR 3/2	сс	90	0
А (5-20)	8	7,5YR 3/2	гл	80	1
АВ (20-50)	35	7,5YR 3/4	гл	30	3
В (50-70)	60	7,5YR 5/4	гл	30	5
ВС (70-80)	75	7,5YR 6/3	тс	20	30
С (80-90)	85	7,5YR 8/2	тс	0	100

* тс – тяжелый суглинок, сс- средний суглинок, гл – глина

Содержание гумуса в слоях вала также неодинаково: от 2 % в минеральных горизонтах до 4-5 % в современных дневных почвах, и до 9 % в погребенной под валом почве. Реакция среды почвенного раствора в верхних частях изученных профилей слабо- и средне-щелочная, в погребенной почве под памятником – близкая к нейтральной (табл. 2), а в нижних горизонтах фонового чернозема - сильнощелочная. Все почвенные профили вскипают от карбонатов с поверхности. Судя по высоким значениям рН и неравномерному распределению карбонатов по профилю раскопа, для укрепления конструкции вала использовались растворы карбонатов кальция и гипса, которыми, по-видимому, проливали слои сооружения. Устойчивости вала способствовала и его геометрия, а именно оптимальный коэффициент откоса склонов. Естественный угол откоса склоны приобретают в ходе их строительства и последующей истории существования (Ковалев и др., 2020).

Таблица 2. Химические свойства исследованных почв и культурных слоев

Горизонт	Средняя глубина, см	рН	δ^{13} Сорг, ‰	С, %	Н, %	карбонаты, %
Разрез 3 (центральная часть вала)						
А (0-14)	7	8.2	-25.95	2.3	0.2	53.56
АВ1 (14-33)	25	8.6	-24.99	1.7	0.2	39.54
А1 (33-50)	41	8.4	-24.83	2.8	0.3	31.68
АВ2 (50-60)	55	8.5				45.04
А2 (80-90)	85	7.9	-39.74	2.3	0.2	43.19
АВ3 (90-100)	95	7.9				46.72
А3 (110-120)	115	7.9	-24.79	2.1	0.2	38.13
АВ4 (120-140)	125	7.8				48.96
Аb (140-155)	147	7.9	-25.82	4.5	0.5	26.66
АВ (155-170)	162	7.9	-24.52	1.2	0.2	46.82
ВС (175-195)	180	7.9				55.59
С (195-200)	197.5					
Разрез 5 (ров, восточная сторона)						
12-28	20	8.4	-25.35	2.0	0.2	40.41

A (28-70)	49	8.4	-25.46	2.5	0.3	23.34
A (70-95)	83	8.4	-25.22	2.6	0.3	33.33
95-130	113	8.5				55.33
Разрез 6 (фон, агрочернозем)						
Ap (0-30)	15	8.3	-26.08	2.7	0.3	27.41
AB (30-60)	45	8.5	-24.81	1.0	0.1	28.65
BC (60-70)	65	8.7				49.38
C (70-80)	75	8.8				63.78
Разрез 7 (темно-серая лесная почва, дубовый лес)						
AO (0-5)	3	8.1	-31.12	5.8	0.4	1.67
A (5-20)	8	8.1	-26.06	4.5	0.4	0.00
AB (20-50)	35	8.0	-25.07	1.4	0.1	0.00
B (50-70)	60	8.4				31.60
BC (70-80)	75	8.4				30.97
C (80-90)	85	8.5				47.08

Интересной особенностью изученного памятника является наличие линии надолб из стволов дуба диаметром около 12 см, остатки которых хорошо сохранились в разрезе 4 и которые свидетельствуют о наличии лесов из широколиственных пород на данной территории в позднем средневековье.

Полученные результаты хорошо согласуются и с данными магнитной восприимчивости изученных почв и культурных слоев (табл. 3). Значения магнитной восприимчивости минимальны в слоях почвообразующей породы под валом и максимальны в поверхностных и погребенных гумусовых горизонтах, однако, наибольших значений они достигают в погребенной под валом почве, диагностируя наиболее гидроморфные условия, по-видимому, черноземно-луговой стадии почвообразования.

Таблица 3. Физические свойства почв

Горизонт	Средняя глубина, см.	Магнитная восприимчивость, $X \cdot 10^{(-6)}$	Электропроводность, мСм/см.
Разрез 1 (основание вала, западная сторона)			
Ad (0-10)	5	49.45	0.45
A (10-40)	25	46.31	0.39
C (40-50)	140	4.46	0.06
Разрез 2 (средняя часть западной стороны)			
Ad (0-10)	5	52.91	0.24
C (10-20)	15	58.95	0.37
Ab (20-40)	30	79.74	0.32
ABb (40-50)	45	42.56	0.28

Разрез 3 (центральная часть вала)			
A (0-14)	7	37.47	0.28
AB1 (14-33)	25	38.24	0.14
A1 (33-50)	41	68.9	0.41
AB2 (50-60)	55	65.32	0.68
A2 (80-90)	85	63.1	2.04
AB3 (90-100)	95	18.27	3.23
A3 (110-120)	115	32.75	2.29
AB4 (120-140)	125	17.38	3.80
Ab (140-155)	147	84.83	1.28
AB (155-170)	162	19.35	2.49
BC (175-195)	180	4.18	2.92
C (195-200)	197.5		
Разрез 4 (основание вала, восточная сторона)			
0-10	5	33.61	0.21
20-30	25	91.94	0.32
Разрез 5 (ров, восточная сторона)			
12-28	20	35.43	0.17
A (28-70)	49	59.56	0.27
A (70-95)	83	68.62	0.29
95-130	113	19.56	0.14
Разрез 6 (фон, агрочернозем)			
Ap (0-30)	15	54.91	0.40
AB (30-60)	45	23.16	0.22
BC (60-70)	65	3.45	0.09
C (70-80)	75	0	0.09
Разрез 7 (фон, темно-серая лесная почва, дубовый лес)			
AO (0-5)	3	60.56	0.60
A (5-20)	8	54.65	0.53
AB (20-50)	35	54.03	0.56
B (50-70)	60	7.05	0.24
BC (70-80)	75	8.53	0.19
C (80-90)	85	3.55	0.14

Подтверждением луговой стадии развития почвы под валом и более близкого к поверхности уровня грунтовых вод в прошлом могут служить и величины электропроводности почв. Определение электропроводности методом паст, доведенных до нижнего предела пластичности, обнаруживает засоление очень сильной, сильной и средней степени в погребенной почве под валом и в нижних частях земляной конструкции, что связано с высоким содержанием карбонатов и

гипса в грунтовой воде, материнской породе, а также с технологией замеса известковых материалов в нижних слоях конструкции.

С величинами электропроводности коррелируют (коэффициент корреляции $> 0,60$) значения магнитной восприимчивости, а также изотопного состава органического углерода. Профильное варьирование значений изотопного состава углерода также соответствует выделенным слоям земляной конструкции.

Выводы

Анализ материалов конструкции Острогжского вала и погребенных под ним почв показал, что валы строились из местных почв с добавлением речного ила и материнской породы мело-мергелиевого состава. Впоследствии их свойства менялись однонаправленно и отлично от свойств фоновых почв.

В конструкции вала выявлены 4 гумусированных слоя и 4 слоя породы.

Установлены особенности технологии строительства изученного памятника: метод ленточного глинобита, использование речного ила, карбонатов и гипса для укрепления земляной конструкции, чередование грунтов разной плотности, разного гранулометрического состава и разной щебнистости, переслаивание породы дерниной.

Благодарность

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-68-00011, <https://rscf.ru/project/24-68-00011/>»

Литература

Голотвин А.Н., Бессуднов А.Н. (2023) Некоторые итоги археологического изучения Белгородской черты. *Археология Евразийских степей* **6**, 63-93.

Ковалев И.В., Ковалева Н.О. (2020) Особенности архитектуры земляных средневековых фортификационных сооружений (на примере Тамбовского вала). *Социоестественная история XXI*. Природа и общество: социоприродное взаимодействие во всемирно-историческом процессе. М: МАКС-ПРЕСС. 193-204.

Сверчкова А.Э. (2023) Крупные курганы эпохи бронзы в степной зоне России как архив палеоэкологической информации и технологий земляного строительства. Автореферат на соискание ученой степени кандидата биологических наук. М., 25 с.

УДК 631.43

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ И ВЛАЖНОСТНОЙ РЕЖИМЫ ВЕРХНЕГО СЛОЯ УРБАНОЗЕМА ПОД РАЗНЫМИ МУЛЬЧИРУЮЩИМИ СУБСТРАТАМИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Силаев М.В., Ахметзянова Р.Р., Ежелев З.С.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
silaevmv@my.msu.ru

TEMPERATURE AND WATER REGIMES OF THE UPPER LAYER OF URBAN SOIL
UNDER DIFFERENT MULCHES IN SUMMER

Silaev M.V., Akhmetzyanova R.R., Ejelev Z.S.

Soil science faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: Temperature and moisture data of urban soil under different mulches during the summer period were analyzed. Significant differences in the effect of the substrates on the soil were identified.

Введение

Мульчирование распространенный агротехнический прием, применяемый как в сельском хозяйстве, так и в ландшафтной городской архитектуре. Многими исследователями было отмечено повышение влажности, снижение максимальных летних и повышение минимальных зимних температур, стабилизация суточных температурных амплитуд и уменьшение испарения воды.

Цель работы заключалась в оценке влияния 11 распространенных в ландшафтной архитектуре мульчирующих материалов на температурный и влажностной режимы городской почвы в летний период, на примере инструментальных площадок почвенного стационара МГУ имени М.В. Ломоносова.

Объекты и методы

Объект исследования

Объект исследования представлен 12 опытными площадками 3x1 метр, заложенными в ноябре 2021 года на территории инструментальных площадок почвенного стационара МГУ имени М.В. Ломоносова. Для покрытия было выбрано 7 органических (кокосовые чипсы, сосновая щепа крашенная и некрашенная, кора лиственницы крупная и мелкая фракции, кора сосны крупная и мелкая фракции) и 4 минеральных субстрата (змеевик, мрамор, вулканический туф и пеностекло). 11 из 12 площадок были покрыты выбранными мульчирующими субстратами. Толщина мульчирующего слоя на всех площадках составила 5 см, исходя из рекомендуемых производителями способов нанесения мульчи на почву. Почвы площадок представлены урбанозёмом (урбостратозём) среднесуглинистый. Перед

проведением эксперимента почва площадок была гомогенизирована путём вспашки на глубину до 25 см и выровнена.

На первом метре каждой площадки проводились режимные наблюдения температуры в течение всего периода эксперимента и измерения влажности верхнего слоя в летний период. В работе представлены наблюдения за летний период 2022 и 2023 годов.

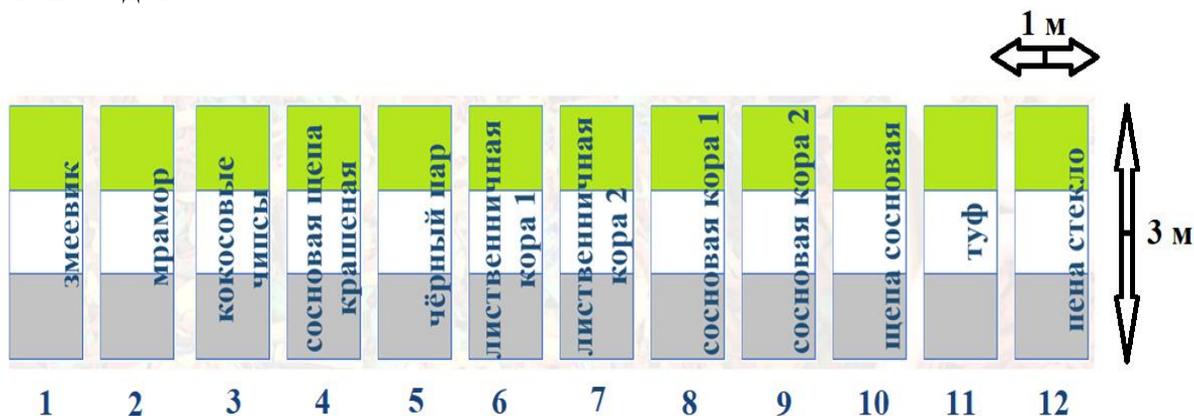


Рис.1. Схема расположения площадок

Методы исследования

Для оценки влагоудерживающей способности мульчирующих субстратов измерялась наименьшая влагоемкость (НВ). Субстраты были погружены в металлические колонки и в последствие через влагопроницаемую мембрану были насыщены до состояния полной влагоемкости (ПВ). В последствие после стекания свободной гравитационной влаги были взвешены и высушены до абсолютно сухого состояния. Определение проводилось в трехкратной повторности.



Рис.2. Схема уставки датчиков

Для измерения температуры на каждой площадке были установлены температурные датчики Elitech rc-4, Elitech, UK. Для установки датчиков были выбраны глубины 0 см (непосредственно под слоем мульчи), 5 см и 10 см. Данные глубины были выбраны с целью фиксации наибольших изменений температуры почвы, то есть глубины её наибольшей суточной вариабельности.

Измерение влажности проводилось влагомером HH2 moisture meter с установленным датчиком влажности M13 ThetaProbe, Detla-t device, UK. Измерения проводились в трехкратной повторности на каждой площадке в летний период. Получены значения объемной влажности в верхнем слое почвы до 10 см. Использовались предустановленные настройки для измерения в органоминеральных почвенных горизонтах.

Результаты и обсуждение

Влагоудерживающая способность мульчирующих субстратов

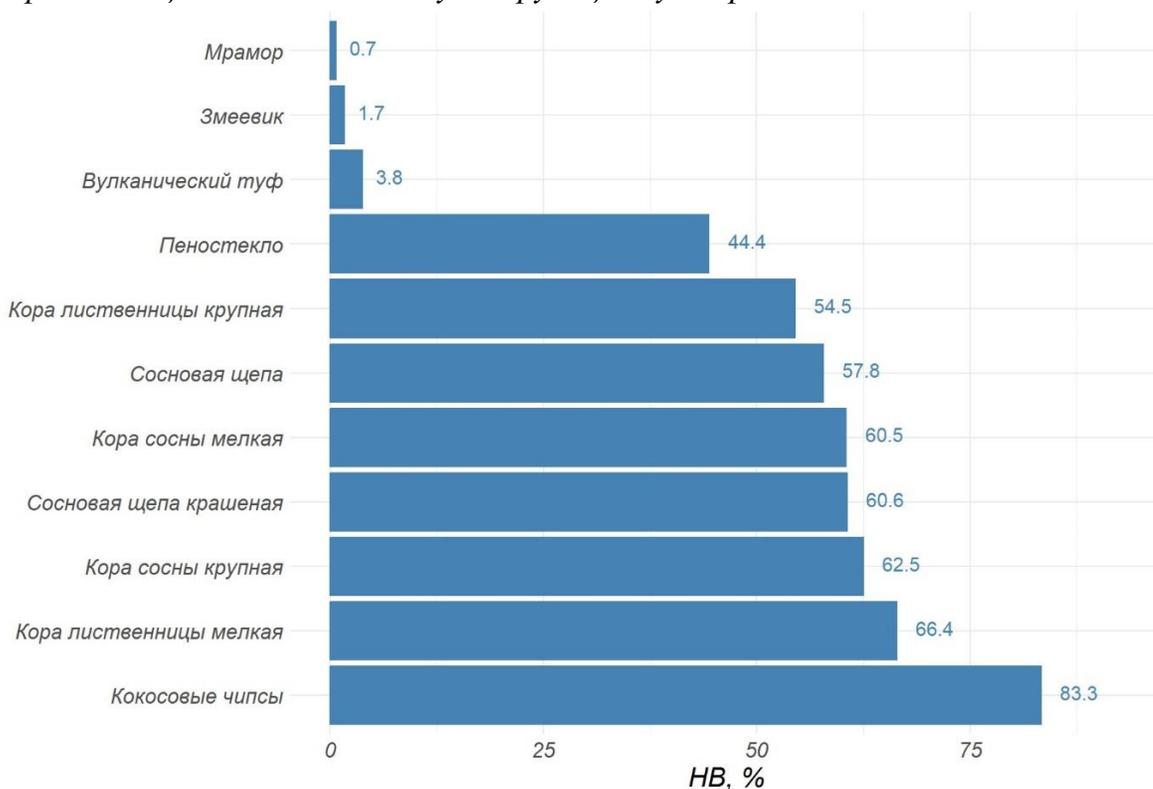


Рис. 3. Влагоудерживающая способность мульчирующих субстратов

По результатам определения влагоудерживающей способности мульчирующих субстратов можно отметить следующее (Рис. 3). Так наибольшая влагоудерживающая способность характерна для органических субстратов, для которых она лежит в пределах 54,5-83,3%. При этом наибольшее количество воды

удерживается кокосовыми чипсами (НВ – 83,3%), для остальных органических субстратов НВ составляет от 54,5 до 66,4%. Наименьшее количество влаги удерживается минеральными субстратами (НВ от 0,7 до 3,8%), за исключением пеностекла. Которое показало наиболее приближенную к органическим субстратам влагоудерживающую способность – 44,4%. Подобные высокие значения НВ у пеностекла могут быть связаны с открытым поровым пространством субстрата.

Влажность верхнего слоя почвы под мульчирующими субстратами

В течение летнего периода 2022 и 2023 годов проводились режимные наблюдения влажности почв на экспериментальных площадках. В 2022 году измерения проводились в период с 6 июня по 5 сентября. В 2023 году измерения проводились в период с 3 июня по 13 сентября.

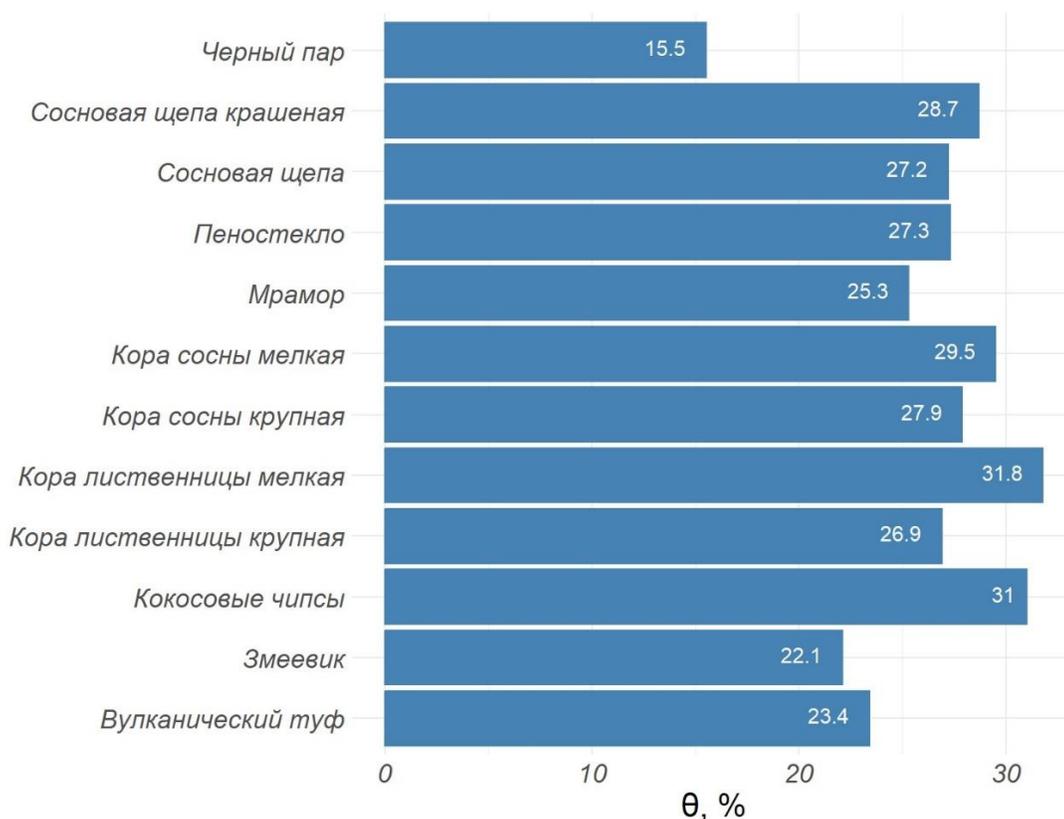


Рис.4. Средняя влажность за летний период 2022 года по площадкам

В первую очередь для полученных данных за 2022 год были построены столбчатые диаграммы средней влажности, позволяющие нам увидеть

существенную разницу во влажности субстратов, как и по сравнению с фоновой площадкой, так и между самими субстратами (Рис. 4.). Данная разница может быть обоснована, полученными ранее данными по влагоудерживающей способности, так и различным цветом мульчирующих субстратов и соответственно количеством поглощаемой солнечной энергии.

При анализе полученных данных можно увидеть значительное увеличение объемной влажности почвы под мульчирующими субстратами, по сравнению с фоновой площадкой (черный пар). Так минимальное увеличение зафиксировано под минеральными субстратами (повышение на 6,6-9,8 %) к которым относятся змеевик, мрамор и вулканический туф. Наибольшие значения средней объемной влажности отмечены под мелкодисперсными органическими субстратами кокосовые чипсы (31,0 %), кора лиственницы мелкая фракция (31,8%) и кора сосны мелкая фракция (29,5%).

В дальнейшем для более глубокого анализа полученных значений влажности за два летних периода был проведен кластерный анализ с использованием метода k-средних. Анализ был проведен с использованием языка программирования R. В первую очередь для нормализованного набора данных было определено количество кластеров с помощью поиска наименьших сумм квадратов внутри кластеров. Так оптимальное количество кластеров составило 4.

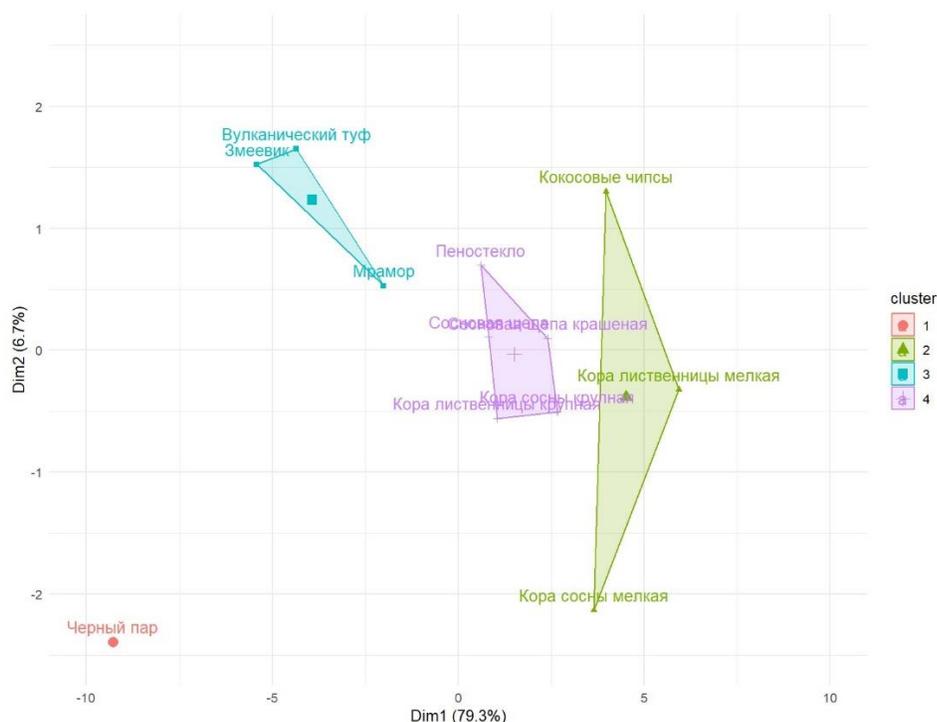


Рис. 5. Результаты кластерного анализа влажности почвы за летний период 2022 и 2023 годов

Кластерный анализ распределения мульчирующих субстратов по влажности почвы под ними показал, что наибольший кластер составляют следующие близкие по влагоудерживающей способности мульчирующие субстраты: пеностекло, сосновая щепа, сосновая щепа крашенная, кора лиственницы крупная и кора сосны крупная (Рис. 5). Этот же кластер объединяет вместе мульчу с средней влажностью почвы под ней за 2022 год около 27%. Следующий по размеру кластер представлен субстратами с наибольшей влагоудерживающей способностью и наибольшими средними показателями влажности: кокосовые чипсы, кора лиственницы мелкая и кора сосны крупная. Кластер 3 представлен минеральными субстратами с низкой влагоудерживающей способностью: вулканический туф и змеевик. Черный пар был выделен в отдельный кластер.

Температурный режим верхнего слоя урбанозёма

Для анализа температурного режима верхнего слоя урбанозёма в летний период были взяты данные, полученные за июнь 2023 года. Так по данным, полученным с метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова, наибольшая температура воздуха на высоте 2 м в исследуемый период составила 26,5 °С, а наименьшая 5,9 °С и амплитуда 20,6 °С соответственно. Подобная месячная амплитуда температур позволяет проанализировать полученные данные температуры почвы, как и в условиях существенного падения температур, так и роста.

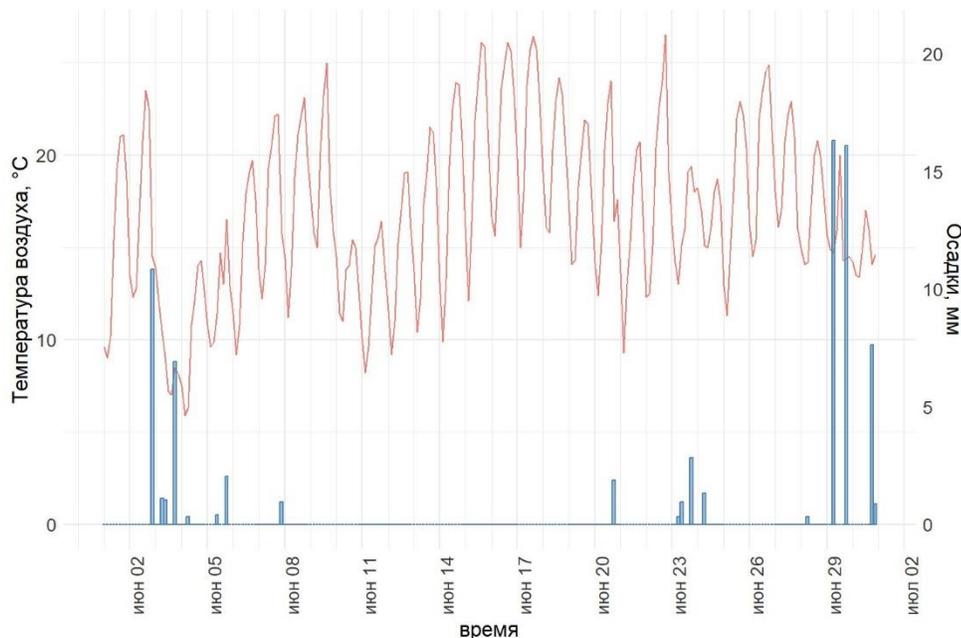


Рис. 6. Температура воздуха и осадки за июнь 2023 года по метео данным метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова

Таблица 1. Температурный режим урбаноёма на глубинах 0, 5, 10 см под разными мульчирующими субстратами

Номер площадки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Субстрат	ЗМЕЕВИК	МРАМОР	КОКОСОВЫЕ ЧИПСЫ	СОСНОВАЯ ШЕПА КРАШЕНАЯ	ФОН (ЧЕРНЫЙ ПАР)	ЛИСТВЕННИЦЫ КОРА	ЛИСТВЕННИЦЫ КОРА	КОРА СОСНЫ КРУПНАЯ	КОРА СОСНЫ МЕЛКАЯ	СОСНОВАЯ ШЕПА	ВУЛКАНИЧЕСКИЙ ТУФ	ПЕНОСТЕКЛО
0 см												
кол-во измерений	240	240	240	240	240	240	240	240	240	-	-	240
среднее	17,0	17,4	16,5	16,8	21,3	17,0	17,5	16,6	17,8	-	-	17,6
минимум	7,6	7,4	10,4	9,1	5,1	10,2	12,1	10,7	10,9	-	-	10,4
медиана	17,0	17,3	16,9	16,4	18,4	17,2	17,9	16,9	18,0	-	-	17,3
максимум	25,3	27	20,7	26	47,7	22,6	21,5	21,4	23,7	-	-	30,1
амплитуда	17,7	19,6	10,3	16,9	42,6	12,4	9,4	10,7	12,8	-	-	19,7
5 см												
кол-во измерений	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
среднее	16,7	16,7	15,9	17,3	19,0	16,8	17,4	16,7	17,9	17,1	20,1	17,5
минимум	8,3	9,5	11,1	11,5	7,2	10,7	12,6	11,4	10,8	11,2	10,8	11,5
медиана	16,9	17,0	16,3	17,7	18,4	17,1	17,8	17,1	18,2	17,4	20,1	17,9
максимум	24,2	22,6	19	21,8	29,1	21,8	21,1	20,5	23,6	21,7	28,1	22,8
амплитуда	15,9	13,1	7,9	10,3	21,9	11,1	8,5	9,1	12,8	10,5	17,3	11,3
10 см												
кол-во измерений	136	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
среднее	16,3	16,5	15,9	16,7	19,0	16,7	17,1	16,7	17,8	17,3	19,6	18,1
минимум	9,9	10,6	11,8	11,8	9	11,8	12,7	11,9	11,7	12,2	11,6	13,4
медиана	16,2	16,9	16,3	17,1	18,8	17,2	17,5	17,1	18,2	17,8	19,7	18,8
максимум	23,3	21,1	18,7	20,2	27,8	20,5	20,4	20,2	22,4	21,3	26,3	22,2
амплитуда	13,4	10,5	6,9	8,4	18,8	8,7	7,7	8,3	10,7	9,1	14,7	8,8

Так на поверхности почвы, непосредственно под мульчей (глубина 0 см), по полученным данным видно, что наибольшие амплитуды температур были зафиксированы под минеральными субстратами. Подобная закономерность может быть обоснована высокой теплопроводностью пород в условиях низкой влажности субстратов. В предыдущий месяц по метеоданными сумма осадков составила всего 25,9 мм, что ниже климатической нормы по исследуемой территории. В подобных

условиях минеральные мульчирующие материалы предположительно показывают низкую теплоемкость, что в свою очередь вызывает ускоренный нагрев поверхности. При этом также можно отметить, что под большинством органических субстратов, за исключением крашенной сосновой щепы, амплитуда температур была значительно ниже и находилась в пределах 9,4-12,8 °С. Отклонение крашенной сосновой щепы от общего тренда для органических субстратов может быть спровоцировано красным цветом субстрата и соответственно низким альбедо. В тоже время под крашеной щепой максимальный зафиксированные температуры были близки и превосходили минеральные субстраты (змеевик).

При переходе на 5 см в первую очередь обращает на себя внимание снижение амплитуды температуры под крашенной щепой и пеностеклом до 10,3 и 11,3 °С соответственно. При этом минеральные субстраты, змеевик и мрамор, всё также показывают высокие амплитуды по сравнению с другими субстратами. Подобное снижение амплитуд может быть спровоцировано большей способностью щепы и пеностекла к сохранению почвенной влаги и соответственно повышенной теплоемкости почвы под ними, о чем нам говорит проведенный ранее кластерный анализ. Также существенное внимание на себя обращает вулканический туф, максимальная температура под которым составила 28,1 °С и амплитуда 17,3 °С, что в свою очередь является наиболее близким показателем к черному пару. Подобные высокие значения предположительно спровоцированы низким альбедо поверхности, вследствие черного цвета, и низкой влагоудерживающей способностью. Совокупность двух данных свойств приводит к быстрому прогреванию поверхности и усиленному испарению почвенной влаги. Последнее в свою очередь может приводит к понижению теплоемкости почвы и соответственно большей температуропроводности.

В тоже время температурный режим под большинство органических субстратов на всех исследуемых глубинах отличается большей стабильностью, что в первую очередь может быть обосновано большей влагоудерживающей способностью и меньшей температуропроводностью органических веществ. Так наибольшее внимание на себя обращают кокосовые чипсы и мелкая кора лиственницы, под которыми были обнаружены наименьшие температурные амплитуды при оптимальных максимальных температурах, 18,7 °С и 20,4 °С соответственно.

Для дополнительного анализа общности групп был проведен кластерный анализ методом k-средних, проведенный по той же методике, что и для влажности почвы. Для анализа были выбраны данные, полученные на глубине 5 см, которые отличаются наибольшей полнотой под всеми субстратами. Так определенное оптимальное количество кластеров составило 4, что совпадает с количеством кластеров для влажности почвы.

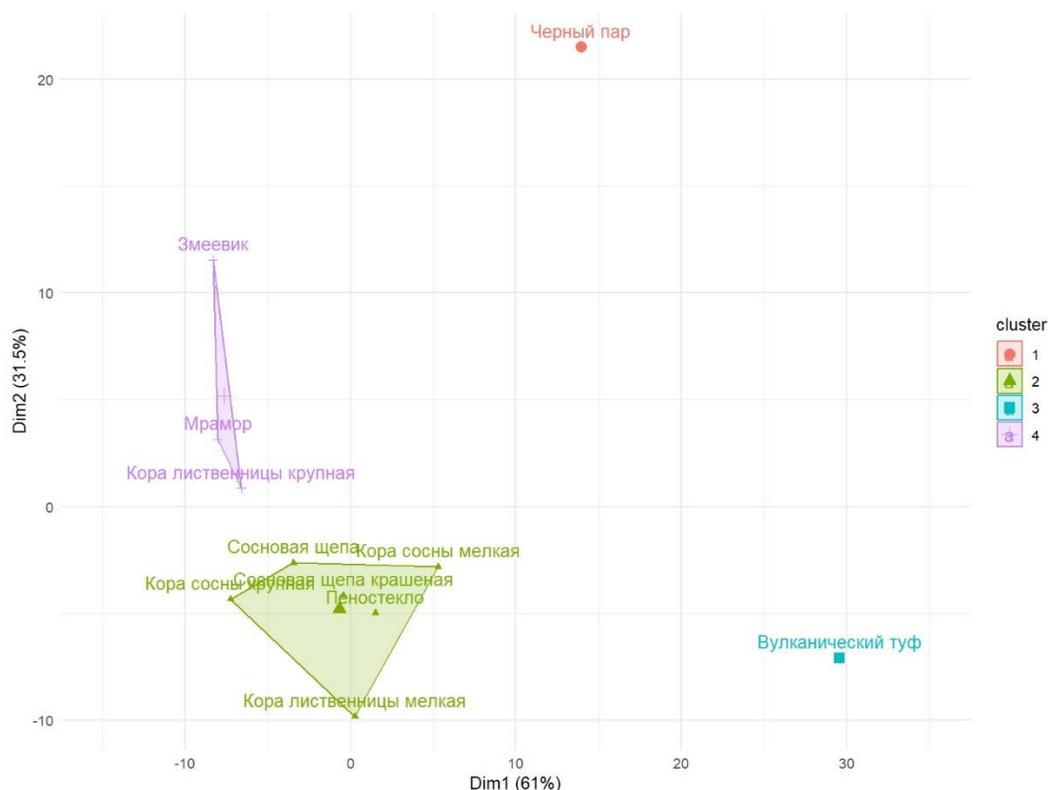


Рис. 7. Кластерный анализ температуры почвы на 5 см в июне 2023 года

Так по результатам кластерного анализа при количестве кластеров равном 4 можно увидеть разделение температуры почвы под субстратами на 4 сильно неравномерных группы. Стоит отметить то, что выбранный способ кластеризации подразумевает под собой сравнение средних. К первой и третьей группе относятся черный пар и вулканический туф соответственно, которые по описанным ранее данным отличаются наибольшими максимальными температурами и амплитудами. Вторая наиболее крупная группа была выделена исходя из приближенных средних температур и объединила в себе почти все органические субстраты и пеностекло. К четвертому кластеру относятся минеральные субстраты, змеевик и мрамор, и крупная фракция коры лиственницы, которые в силу слабой влагоудерживающей способности первых и крупной фракции второго обладают слабой теплоемкостью. Также подобное не совсем типичное распределение может быть спровоцирована малыми объемами атмосферных осадков.

Выводы

- Использование мульчирующих субстратов позволяет повысить влажность почвы. В особенности при использовании мелкодисперсных влагоемких

органических субстратов, к которым среди исследованных относятся кора сосны и лиственницы мелкой фракции и кокосовые чипсы. Среди минеральных мульчирующих субстратов по влажности почвы особое место занимает пеностекло, средняя влажность под которым составила 27,3%, что позволяет его включить в один кластер вместе с другими органическими субстратами.

- Использование мелкодисперсных светлоокрашенных субстратов позволяет поддерживать наиболее стабильный температурный режим почвы на исследуемых глубинах, по сравнению с черным паром.

- Наибольшие амплитуды температур были зафиксированы под вулканическим туфом (17,3 °С), что мы связываем с низким альбедо поверхности, следовательно повышенным испарением влаги почвой, и низкой влагоудерживающей способностью субстрата.

Литература

- Теория и методы физики почв (2007) Под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. Тула: Гриф и К, 616с.
- Kader, M.A. et al. (2017) Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil and Tillage Research*, – 155–166.
- Pavlů L. et al. (2021) The impact of various mulch types on soil properties controlling water regime of the Haplic Fluvisol. *Soil and Tillage Research*. **205**.
- Prokofeva, T. et al. (2020) Morphological and physical properties in diagnostics of urban soils (case study in Moscow). *Soil Science*.
- Zhang, Y. et al. (2021) Effects of organic ground covers on soil moisture content of urban green spaces in semi-humid areas of China. *Alexandria Engineering Journal* **60**, 251–259.

УДК 631.4

ИЗМЕНЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ВЕРХНИХ СЛОЁВ ПОЧВ ЛИЗИМЕТРОВ МГУ В ДЛИТЕЛЬНОМ АСПЕКТЕ

Тазиева А. О., Ахметзянова Р. Р., Мельцаева А. М., Умарова А. Б.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
taxievaao@gmail.com

CHANGES IN THE GRANULOMETRIC COMPOSITION AND STRUCTURE OF THE UPPER LAYERS OF SOILS IN THE MSU LYSIMETERS OVER THE LONG-TERM ASPECT

Tazieva A. O., Akhmetzyanova R. R., Meltsayeva A. M., Umarova A. B.

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russia
taxievaao@gmail.com

Annotation: the study analyzed the structure and granulometric composition of the upper layers of lysimetric soils of the MSU soil station territory. The results obtained by laser diffractometry and Kachinsky pipette method were compared.

Введение

Как известно, городские почвы обладают рядом физических характеристик, которые по своим числовым значениям могут существенно отличаться от одновозрастных естественно-сформированных почв. Для изучения динамики процесса трансформации искусственных почв проводятся многолетние эксперименты. Однако, еще до недавнего времени городские почвы не являлись предметом исследования ученых, и поэтому экспериментальные площадки с известными начальными характеристиками в условиях города очень немногочисленны. Кроме того, постоянное преобразование почвенного покрова урбанизированных территорий еще больше усложняет задачу подбора объекта исследования. Почвы больших лизиметров Почвенного стационара МГУ стали отличным инструментом для наблюдения изменения физических свойств искусственных почв на протяжении нескольких десятков лет.

В работе рассмотрены одни из самых практически значимых почвенных характеристик: гранулометрический состав и структура верхнего, пахотного, горизонта. Полученные в 2024 году данные сравниваются с результатами анализов прошлых лет, что создает целостное представление о трансформации искусственных почв во времени. Также целью работы явилось сравнение двух методов определения гранулометрического состава, седиментационного и лазерной дифрактометрии, на примере почв лизиметрических установок МГУ.

Объекты и методы

Объекты исследования

Объектами исследования выбраны большие лизиметры Почвенного стационара МГУ им. М. В. Ломоносова. Укладка почвы в конструкции была произведена в 1961 году. Емкости из цемента заполнены дерново-подзолистой среднесуглинистой почвой, привезенной из Подольского района Московской области (Умарова, 2011). Различаясь очередностью закладывания горизонтов и последующими способами вспашки, почвы лизиметрических установок демонстрируют, каким изменениям подвержены искусственные почвы и влияет ли последовательность горизонтов на дальнейшую эволюцию почв. Для исследования были выбраны два варианта почв. В лизиметре №10 был смоделирован метод глубокого плантажа по Бушинскому, а в №14 - воссоздана вспашка по Мосолову. Глубокий плантаж подразумевает замену пахотного горизонта иллювиальным $B_{2\text{пах}}$ (0-43 см). В то же время прием, предложенный В. П. Мосоловым, позволяет оставляя пахотный горизонт $A_{\text{пах}}$ (0-20 см) на месте, поменять местами подзолистый горизонт E, и иллювиальный B1 (Умарова, 2011).

Немаловажную роль в выборе объектов исследования сыграл факт, что известны стартовые характеристики почв лизиметров, а в течение функционирования установок, периодически проводится мониторинг свойств почв лизиметров. Таким образом становится возможным сравнение полученных значений в динамике на протяжении длительного промежутка времени.

Методы исследования

В работе были использованы классические методы физики почв. Анализ структуры проводился методами сухого и мокрого просеиваний по Н. В. Савинову (Вадюнина, Корчагина, 1986).

Гранулометрический состав определялся двумя методами. Первый – седиментационный метод пипетки Качинского-Робинсона-Кёхеля (Вадюнина, Корчагина, 1986) с предварительной диспергацией почвенного образца 4% раствором пирофосфата натрия.

Второй метод проведения анализа — лазерная дифрактометрия (Шеин, Милановский и др., 2017), который в последнее десятилетие стал стандартом для определения содержания частиц разного размера. Разрушение почвенных частиц осуществляется с помощью ультразвука. Анализ проводился с помощью лазерного дифракционного анализатора Mastersizer 3000E. Почвенные пробы были отобраны в 2023 году в трех повторностях на каждый из лизиметров.

Результаты и обсуждение

Гранулометрический состав верхних горизонтов лизиметрических почв в многолетнем аспекте

Для исследования изменений гранулометрического состава в многолетнем аспекте был использован седиментационный метод. В распределении гранулометрических фракций заметна разница в процентном содержании илистой фракции и фракции крупной пыли между вариантами, что закономерно обусловлено различным генезисом верхних горизонтов (Рис. 2). Горизонт В₂_{пах}, являясь иллювиальным, содержит больше илистых частиц, в то время как изначально в А_{пах} было более 50% крупной пыли (Табл. 2).

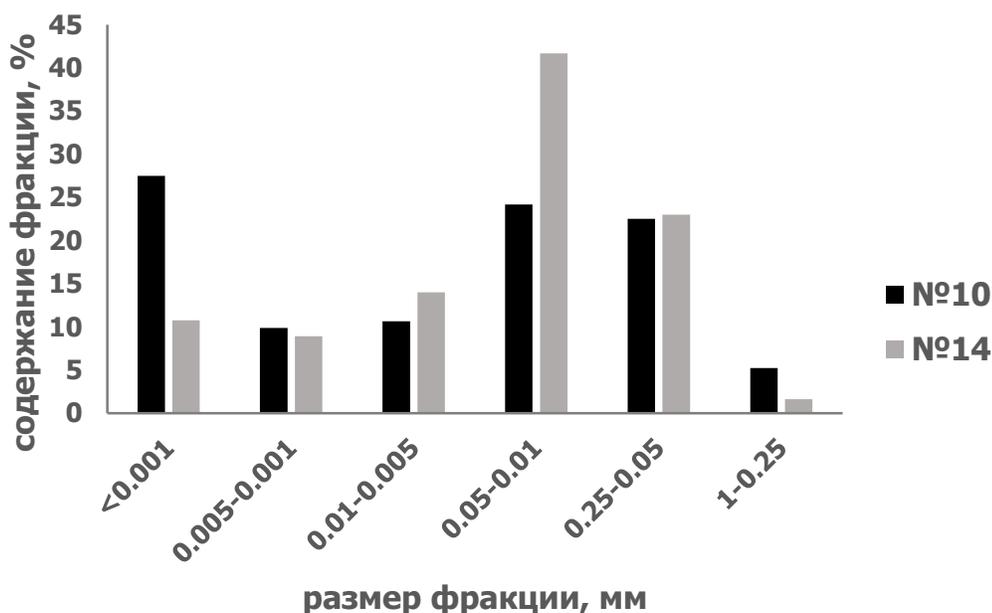


Рис.2. Гистограмма гранулометрического состава почв лизиметров №10 и №14, метод седиментации

Снижение илистой фракции к 2024 году в варианте глубокого плантажа прекратилось, наблюдается некоторая аккумуляция ила по сравнению с 2001 годом. Более того в процессе развития почв произошло значительное снижение доли фракции крупной пыли и увеличение песчаной фракции, что может быть обусловлено расположением исследуемых почв в непосредственной близости от внутренней дворовой проезжей части, где периодически осуществляется противогололедная обработка (табл. 2). Однако это утверждение требует специальных определений антропогенной нагрузки.

Согласно классификации Качинского гранулометрический состав горизонтов остался прежним А_{пах} (физическая глина - 33,7%) – среднесуглинистый, а В₂_{пах} (физическая глина - 48,0%) – тяжелосуглинистый.

Табл. 2. Динамика гранулометрического состава верхних слоёв модельных почв
(данные 1961 и 2001 годов – Умарова, 2011)

	Содержание фракции, %				
	<0.001	0.005-0.001	0.01-0.005	0.05-0.01	1-0.05
лизиметр №10, В_{2пах} (0-43 см)					
1961	32	11	8	38	11
2001	25	10	11	39	15
2024	28	10	11	24	28
лизиметр №14, А_{пах} (0-20 см)					
1961	9	12	11	56	11
2001	10	12	12	52	17
2024	11	9	14	42	25

Рассмотрим динамику содержания илистой фракции. Некоторые колебания значений с начала 2000 года могут быть связаны с разной степенью антропогенного вмешательства, но в целом можно констатировать, что содержание илистой фракции в верхних горизонтах исследуемых почв стабилизировалось. Отметим и тот факт, что существенная разница в распределении ила двух вариантов исследуемых почв к настоящему времени сохранилась. (Рис.3).

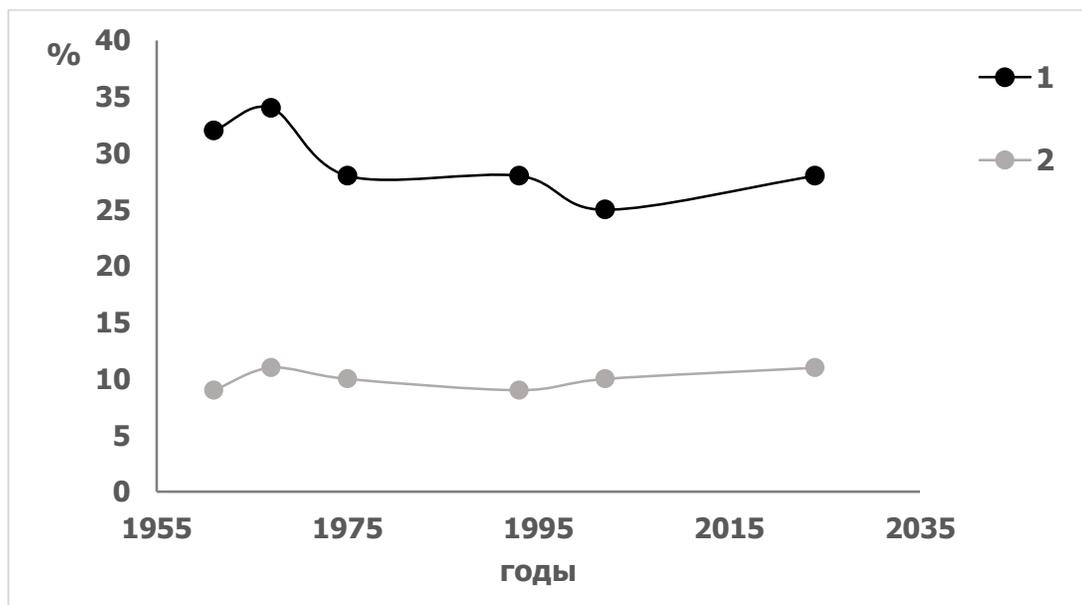


Рис. 3. Многолетняя динамика содержания илистой фракции в поверхностных горизонтах модельных почв. 1- В_{2пах}; 2- А_{пах}

Сравнение лазерной дифрактометрии и седиментометрии

В связи с популярностью метода лазерной дифрактометрии и наличием многочисленных публикаций по сравнению результатов анализа с методом пипетки, в настоящей работе также были использованы оба метода.

При определении обоими методами в почвах обоих лизиметров преобладает фракция крупной пыли (Рис. 2 и 6). Это может быть связано с тем, что данная фракция находится близко к верхней технической границе применимости прибора. Также можно отметить заниженное содержание илистой фракции по сравнению с определением методом пипетки Качинского и повышение доли мелкой пыли (Рис. 2 и 6). Подобный характер расхождения значений для вышеперечисленных фракций был выявлен и в ряде других работ, отмеченных в статье Калужского 2010 года о сравнении двух методов. Видимо, мелкие частицы пыли, содержащие органические вещества с меньшей плотностью по сравнению с минеральными частицами, имеют более низкую скорость осаждения и попадают в фракцию ила при расчете по уравнению Стокса.

Содержание физической глины оказалось равным 40,2% в десятом лизиметре и 37,6% - в четырнадцатом. По Н. А. Качинскому верхний горизонт лизиметра №10 соответствует тяжелому суглинку, а 14 – среднему. Хотя численно содержание отдельно взятых фракций сильно различается в зависимости от метода анализа, общее содержание физической глины и название гранулометрического состава по Качинскому остается в тех же диапазонах.

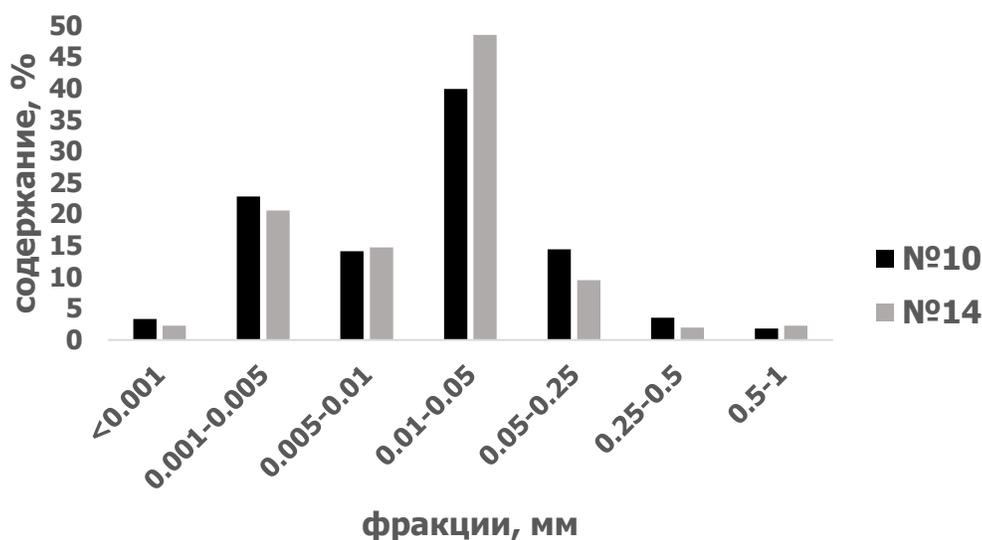


Рис. 4. Гистограмма гранулометрического состава почв лизиметров №10 и №14, метод лазерной дифрактометрии

Из гистограммы на рис. 6 видно, что обе лизиметрические почвы по гранулометрическому составу отличаются слабо. Это приводит к выводу о том, что со временем происходит выравнивание физических свойств изначально различного по своим характеристикам материала под влиянием идентичных факторов почвообразования.

Структура верхних горизонтов лизиметрических почв

Переходя к следующей физической характеристике почв, важно отметить, что дисперсность почвы как системы неразрывно связана с формированием структуры, ведь превалирование илистой фракции создает оптимальные условия для слипания ЭПЧ и появления крупных агрегатов. Пылеватая фракция не способствует развитию бесструктурных почв и одновременно с этим не является столь же эффективным клеящим компонентом для формирования большого количества крупных агрегатов.

Начальные физические свойства верхних горизонтов почв лизиметров сильно различались. В лизиметре №14 верхний слой представлен пахотным горизонтом с зернисто-комковатой структурой. Начальная структура поверхностного горизонта В2 лизиметра №10 - крупная глыбистая (Умарова, 2011).

Таблица 1. Агрегатный состав верхних горизонтов почв лизиметров в 1961 и 2023 годах в процентах

размер, мм	>10	7-10	5-7	3-5	1-3	0.5-1	0.25-0.5	<0.25
лизиметр 10								
1961	51	10	7	10	16	3	1	1
2023	28	17	15	18	14	2	1	4
лизиметр 14								
1961	32	13	12	16	20	3	1	3
2023	13	14	12	21	26	5	3	7

При отборе проб в 2023 г. структура верхнего горизонта варианта вспашки по Мосолову морфологически была оценена как зернисто-комковатая. В верхнем слое варианта глубокого плантажа продолжают превалировать более крупные агрегаты, однако сейчас ее можно охарактеризовать как непрочную-глыбистую. Результаты сухого просеивания показали, что с 1961 года значительно уменьшилась доля агрегатов размером >10 мм в обоих случаях (табл. 1). В варианте глубокого плантажа количество агрегатов более 10 мм сократилось почти в 2 раза. А в варианте вспашки по Мосолову – в 2,5 раза. Это привело к закономерному увеличению процентной

доли фракций, чей размер меньше. Тем не менее процентное содержание самых мелких агрегатов, меньше 1 мм, со временем изменяется с меньшей интенсивностью (табл. 1). В процессе трансформации верхних слоев лизиметрических почв со временем наблюдается тенденция к разрушению крупных структурообразующих единиц до агрегатов среднего размера.

Мокрое просеивание выполнялось для оценки водопрочности структуры лизиметрических почв. Низкая устойчивость к действию воды продолжает сохраняться в почве лизиметра №14, процентное содержание агрегатов менее 0,25 мм достигает значения в 68%. Верхний горизонт варианта глубоко плантажа обладает большей водостойкостью.

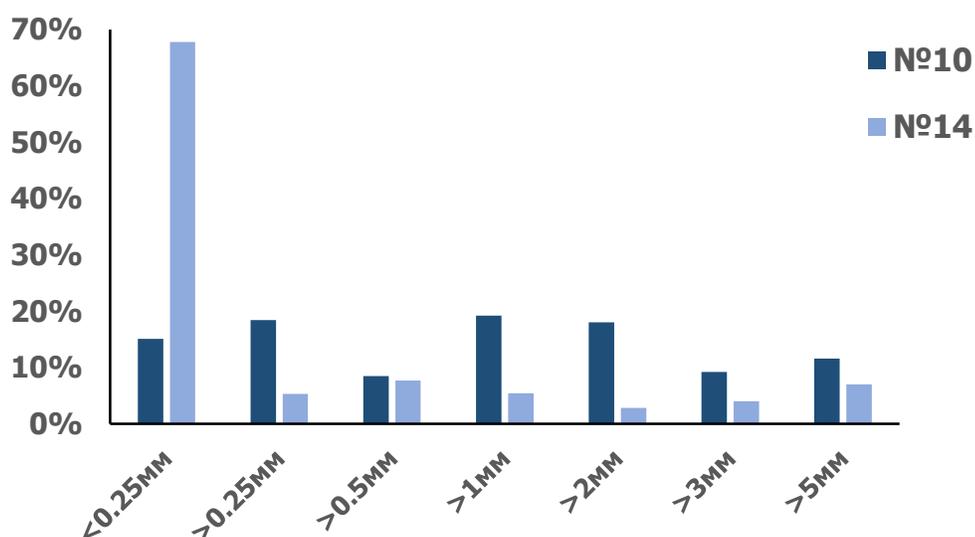


Рис. 1. Водостойкость структуры верхних слоёв лизиметрических почв в лизиметрах №10 и №14

Оценка структурного состояния модельных почв была проведена по количеству агрономически ценных агрегатов. Структура почв к 2024 году улучшилась по сравнению с моментом закладки конструкций. В почве десятого лизиметра агрегатное состояние изменилось с хорошего на отличное, повысилось содержание агрегатов размером 0,25-10 мм с 47% до 67%, в почве 14 лизиметра осталось на отличном уровне, при этом процент агрономически ценных агрегатов также возрос с 65% до 81%. Такое улучшение обоих вариантов может быть связано как с абиотическими факторами, так и действием живых организмов: травянистой растительности и зообиоты. Отметим и фактор минимального механического воздействия на почвы и отсутствия внесения минеральных удобрений с 80-х годов прошлого века.

Выводы

1. В процессе многолетней трансформации структура верхних слоев лизиметрических почв улучшатся за счет снижения содержания глыбистой фракции в обоих вариантах.
2. За 60 лет процесс развития искусственных почв привел к стабилизации содержания илистой фракции.
3. Согласно результатам определения гранулометрического состава методом пипетки варианты исследованных почв продолжают сохранять значительную разницу в содержании гранулометрических фракций, причем горизонт В2 пах имеет два максимума – частиц <0,001 мм и 0,01-0,25, а горизонт Апах – один отчетливый максимум для частиц размером 0,01-0,05.
4. В отличие от метода пипетки результаты, полученные методом лазерной дифрактометрии показали очень схожие данные по распределению гранулометрических фракций обеих почв. Однако, использование классификации Качинского с учетом типа почвообразования дает близкие значения содержания физической глины и физического песка, что делает возможным дальнейшее использование двух методов анализа для вопросов определения классификационной принадлежности.

Литература

- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.Я. (1973) Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.; “Высшая школа”, 416 с.
- Коллективная монография под ред. Шеина Е. В., Карпачевского Л. О. (2007). Теория и методы физики почв. М.; Тула: Гриф и К, 616 с., 2007
- Кулижский, Н.Г. Коронатова, и др. (2010) Сравнение методов седиментометрии и лазерной дифрактометрии при определении гранулометрического состава почв естественных и техногенных ландшафтов, *Вестник Томского государственного университета. Сер. 12. Биология* 4
- Умарова А. Б. (2011) Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв, М.: ГЕОС, 265 с.
- Умарова А. Б., Архангельская Т. А., Кокорева А. А., Ежелев З. С. и др. (2021) Многолетние исследования физических свойств почв в больших лизиметрах МГУ: основные итоги первых 60 лет (1961–2021), *Вест. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение* 3
- Шейн Е. В., Милановский Е. Ю., Хайдапова Д. Д., Поздняков А. И. и др. (2017) Практикум по физике твердой фазы почв: учебное пособие, 119 с.
- Шейн Е. В., Архангельская Т. А., Гончаров В. М. и др. (2001) Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв, М.: Изд-во МГУ, 200 с.

УДК 631.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ В ЦЕЛЯХ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНО НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Чжан Ичжоу¹, М. В. Евдокимова¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
soil.resources@mail.ru

INVESTIGATION OF THE ECOLOGICAL STATE OF LAND IN THE TULA REGION FOR
THE PURPOSES OF IDENTIFYING LOCALLY UNFAVORABLE TERRITORIES

Zhang Yizhou¹, Evdokimova Maria V¹

¹ Lomonosov Moscow State University

Annotation: The spatially distributed assessment of the ecological state of the lands of the Tula region is given. The latter is based on a detailed satellite survey of entire territory as a reference for further monitoring and control of land degradation. The maps of the distribution of land productivity values, as well as a generalizing indicator of land degradation characterizing the ecological state of the lands of the Tula region for the reference period from 2001 to 2020 were obtained. It was found that at the end of 2020 26.48 % of the region's territory belongs to the category of potentially degraded by the SDG indicator 15.3.1. 17.97% of lands belongs to the category of improved during the same period, and 73.42% belongs to their sum with the category of stable lands. The trends of decreasing the amount of photosynthetically active biomass both on the entire territory of the region and on the reference sites of natural monuments have been revealed.

Введение

Глобальная деградация земель – главный вызов человечества, препятствующий обеспечению продовольственной безопасности и устойчивому развитию стран. В связи с этим ООН (Резолюция..., 2015) выдвинута инициатива «нейтрализации деградации земель», залогом успеха которой является выявление текущего состояния земель как основы для мероприятий по устранению деградации в рамках единого подхода с использованием материалов дистанционного зондирования Земли. Работы по анализу состояния земельных ресурсов получили широкое распространение в связи с возрастающими масштабами и темпами деградации, обусловленной различными природными и антропогенными факторами (Sims et al., 2019). Методами исследования, адекватными масштабу проявления деградации, являются лишь методы дистанционного зондирования Земли из космоса (Gonzalez-Roglich et al., 2019), основанные на вегетационных индексах, получаемых в результате обработки материалов мультиспектральной съемки земной поверхности с искусственных спутников Земли.

Наиболее используемым является нормализованный вегетационный индекс NDVI (Normalized difference vegetation index), рассчитываемый как частное от

деления разности коэффициентов отражения земной поверхностью, покрытой растительностью, в инфракрасном диапазоне электромагнитного излучения и в красном оптическом диапазоне на их сумму (Tucker, 1979; Wessels et al., 2012). Обзор литературы свидетельствует о том, что проблема деградации земель является одной из самых острых проблем современности (Cui et al., 2012; Nouri, et al., 2014; Eckert et al., 2015; Zoungrana et al., 2018).

В работе (Андреева, Куст, 2020) провели оценку состояния земель большинства субъектов РФ, за исключением Республики Саха (Якутии) и Красноярского края, на основе концепции нейтрального баланса деградации за период с 2001 по 2015 гг., при этом отметили трудности применения методики Trends.Earth (Trends.Earth, 2018) к разнообразным социально-экономическим и физико-географическим условиям страны. По результатам исследования за более длинный период с 2001 по 2020 гг. была построена электронная растровая карта экологического состояния земель всех субъектов Российской Федерации (Евдокимова, 2023).

Цель данного исследования: дать пространственно-распределенную оценку экологического состояния земель Тульской области на основе детальной космической съемки всей территории края в качестве эталона для контроля деградации земель.

В задачи исследования входило:

1. Выявление закономерностей пространственной изменчивости индикаторов продукционной способности земель Тульской области, ее растительного покрова и запасов почвенного органического углерода.
2. Выявление закономерностей пространственной изменчивости индикатора деградации (ЦУР 15.3.1) земель Тульской области.
3. Выявление основных факторов деградации земель и оценка рисков деградации земель Тульской области.

Объекты и методы

В качестве целевого показателя деградированности земель использовали индикатор деградации земель ЦУР 15.3.1 (Trends.Earth, 2018; Андреева, Куст, 2020; Евдокимова, 2023), который представляет собой отношение площади деградированных земель к их общей площади, исключая земли под водой, для каждого пикселя на снимках территории. Этот показатель вычислили для каждой территориальной единицы Тульской области. Один пиксель на снимке соответствует квадрату на местности со стороной 250 м. Общая площадь территории, охваченной съемкой, составила 25 тыс. км².

Индикатор деградации земель ЦУР 15.3.1, выражаемый в долях площади, вычисляется (рис. 1) путем обобщения трех независимых показателей, которые выступают в качестве его составляющих (субиндикаторов) (Евдокимова, 2023):

1. Показателя продуктивности земель (Productivity).

2. Показателя оценки последствий от смены типа покрова земной поверхности (Land cover).

3. Показателя оценки изменения запасов углерода органического вещества почвы (Soil carbon).

Показатель продуктивности земель (Productivity) тесно связан с чистой первичной продукцией фотосинтеза, измеряемой в кг/га/год (Евдокимова, 2023). В качестве его замены использовали нормализованный вегетационный индекс (NDVI), рассчитанный по материалам спутниковых данных MODIS. По снимкам с 2001 по 2020 гг. для каждого года и каждого пикселя вычисляли среднюю за вегетационный сезон величину NDVI, которую и использовали в качестве замены показателя чистой первичной продукции фотосинтеза. Полученные таким образом значения NDVI послужили основой для расчетов трех вспомогательных величин (Евдокимова, 2023):

1. Показателя скорости изменения NPP со временем (Trajectory=Trend of Productivity).

2. Показателя текущего состояния производительной способности земель, представляющего собой меру отклонения текущей производительной способности от средней (Performance of Productivity) за опорный период (в данном случае с 2001 по 2020 г.).

3. Показателя эффективности производительной способности земель (State of Productivity).

Вычисление показателя тенденции (тренда) в изменении продуктивности земель со временем осуществлялось на основе анализа внутригодовой и межгодовой динамики NDVI (тест тренда Манна-Кендалла). Тенденцию в изменении показателя скорости (межгодовой разницы нормированной) изменения чистой первичной продукции фотосинтеза (NPP) со временем вычисляли методом линейной регрессии усреднённых за вегетационный период величин NDVI по времени для всего опорного периода с 2001 по 2020 г. Полученные результаты оценивали следующим образом: если угловой коэффициент теоретической прямой значительно превышал ноль, делался вывод об улучшении состояния земель по этому показателю, если он равнялся нулю, то делался вывод об отсутствии изменений в состоянии земель по этому показателю, а если он оказывался значительно меньше нуля, делался вывод об ухудшении состояния земель по этому показателю, то есть, о деградации земель. В качестве причин смены тренда чаще всего выявляются антропогенные воздействия, либо климатические изменения (Li Q, 2016; Pan N, 2018; Евдокимова, 2023).

Экологическое состояние земель региона зависит от интенсивности антропогенного воздействия на них, которое в самом первом приближении согласно перечню национальных индикаторов ЦУР (цель № 11 «Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов») (Национальный набор показателей ЦУР, 2022) может быть количественно

охарактеризовано значениями плотности населения в субъектах Российской Федерации и величинами общего количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников, расположенных на территории субъекта (среднее значение показателя за период с 2010 по 2013 гг.) (Евдокимова, 2023), которые были рассчитаны на основе открытых статистических данных Росстата по численности населения по состоянию на 01.01.2021 г. по среднегодовым объемам выбросов от стационарных источников (табл.). Учитывались все загрязняющие вещества, поступающие в атмосферный воздух как после прохождения пылегазоочистных установок в результате неполного улавливания и очистки на организованных источниках загрязнения, так и без очистки от организованных и неорганизованных источников загрязнения.

С ростом антропогенного воздействия индикатор экологического состояния земель сначала растет, достигая некой пороговой величины, а затем закономерно убывает. Пороговую величину воздействия вычисляли на основе математической модели, уравнение решения которой имеет вид (Глазунов и др., 2019; Евдокимова, 2023):

$$y = A * x^{-B} \exp\left(-\frac{K}{x}\right), \quad (1)$$

где x — величина, характеризующая интенсивность воздействия на экосистемы, y — мера отклика экосистем в форме показателя экологического состояния земель, зависимая переменная ($\text{км}^2 \cdot \text{км}^{-2}$), A — коэффициент масштаба, B — коэффициент, характеризующий убывание зависимой переменной с увеличением независимой переменной, K — коэффициент, характеризующий возрастание зависимой переменной с увеличением независимой переменной. Согласно модели и рост и убывание меры экологического состояния земель происходят одновременно. Решение модели имеет указанную форму при условии фиксированного времени. В данном случае зафиксирован промежуток с 2001 по 2020 гг.

Наличие пространственно-распределенных данных об объемах выбросов от стационарных источников загрязнения на Тульской области позволило выявить закон распределения вероятности для данных величин и вычислить эмпирическую обеспеченность для этого распределения, а затем после предварительного вычисления пороговой величины общего количества выбросов оценить риск деградации земель.

Оценка риска деградации земель как разновидность оценки экологических рисков — это процедура, в ходе реализации которой оценивается вероятность того, что в результате экспонирования воздействию одного или нескольких факторов (Евдокимова, 2023), в нашем случае воздействию выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, у экосистем на землях муниципальных образований Тульской области возникают или могут возникнуть неблагоприятные последствия. Последствия считаются нежелательными, если они сопровождаются изменением

функциональных характеристик компонентов экосистем — показателей «продуктивности», трансформации земель, динамики содержания органического вещества в почве и обобщающего их индикатора деградации земель.

Вычислительную часть работы осуществляли на персональном компьютере с использованием офисного пакета Microsoft Office 365, специального алгоритма, созданного на языке Python 3, и географической информационной системы QGIS 3.22. Основная часть работы выполнена с использованием плагина Trends.Earth, который обеспечивает интерфейс доступа к облачным вычислениям на серверах Google Earth Engine, по методикам, изложенным в руководстве пользователя (Trends.Earth, 2018).

Результаты и обсуждение

Основным результатом исследования является карта экологического состояния земель муниципальных образований Тульской области (рис. 1), построенная на основе характеристик первичной продукции фотосинтеза, выведенных из материалов дистанционного зондирования Земли из космоса, в форме показателей «продуктивности», трансформации земель и динамики содержания органического вещества в почве и обобщающего их индикатора деградации земель, а также таблица долей всех категорий состояния земель, определяемых в рамках процедуры оценки целевого индикатора по районам Тульской области к концу периода с 2001 по 2020 гг. (таблица).

Установлена статистически достоверная нелинейная закономерная связь индикатора экологического состояния земель Тульской области (в форме показателя доли недеградированных земель с учетом доли не установленных земель, определяемых в рамках процедуры оценки Trends.Earth) со значениями плотности населения в территориальных единицах Тульской области (рис. 2), имеющая вид:

$$y = 8.97 * x^{-0.48} * \exp\left(-\frac{20.14}{x}\right),$$

а также с величиной общего количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников (рис. 3), расположенных на территории районов Тульской области, имеющая вид:

$$y = 4.67 * x^{0.2} * \exp\left(\frac{190.44}{x}\right).$$

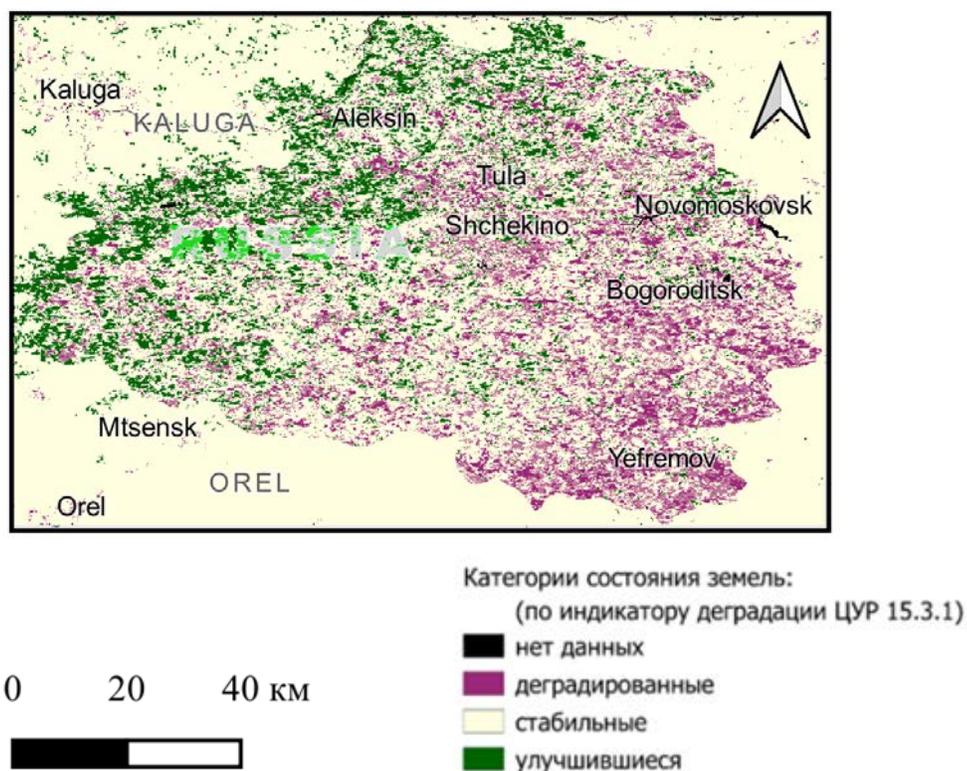


Рис. 1. Карта экологического состояния земель по индикатору деградации ЦУР 15.3.1

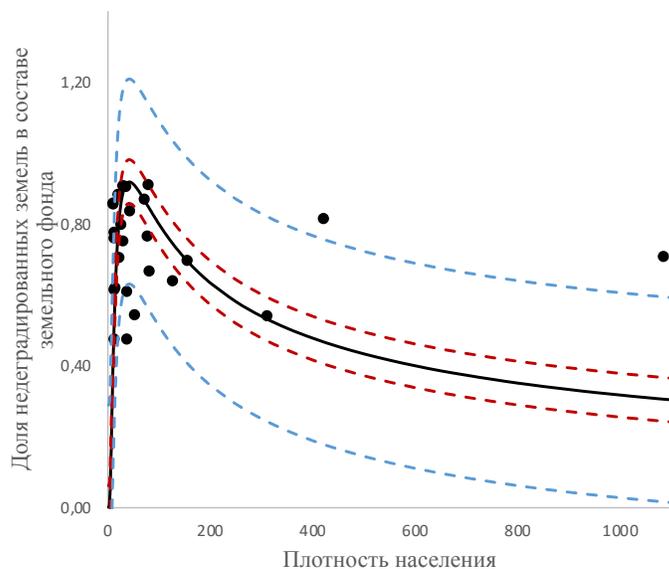


Рис. 2. Зависимость доли недеградированных земель в составе земельного фонда Тульской области с учетом доли земель, не определенных дистанционными методами, от плотности населения: точки — экспериментальные данные, линия — расчет по модели (1)

Таблица 1. Экологическое состояние земель муниципальных образований Тульской области

Регион	Площадь, км ²	Доля земель				Население, чел.	Выбросы, тонн.
		улучшившихся	стабильных	деградированных	нет данных		
Алексинский	925.1	316.0	527.6	79.3	2.2	71,331	2622.75
Арсеньевский	1,068.9	301.2	615.6	152.1	0.0	9,484	46.27
Белёвский	1,187.5	437.5	558.2	191.5	0.3	49,848	86.44
Богородицкий	959.9	25.1	498.3	436.2	0.3	49,848	170.17
Венёвский	1,625.5	209.8	941.5	473.0	1.2	34,238	1051.67
Воловский	1,073.5	72.0	594.5	406.6	0.3	13,992	634.92
городской округ Донской	58.9	7.0	34.7	17.0	0.1	63,837	366.79
городской округ Новомосковск	862.0	121.1	480.5	255.3	5.1	132,470	13181.09
городской округ Славный	26.8	1.3	22.0	3.5	0.0	1,894	24.79
Дубенский	796.1	357.8	347.1	90.6	0.6	15,056	915.63
Ефремовский	1,645.0	44.3	741.2	858.9	0.6	57,881	1925.15
Заокский	915.9	340.6	492.0	82.8	0.5	26,747	207.85
Каменский	795.8	24.0	466.8	305.0	0.0	8,348	61.89
Кимовский	1,110.7	37.6	641.2	430.0	1.9	39,294	2220.27
Киреевский	926.9	77.5	543.3	304.4	1.7	74,078	480.73
Куркинский	953.2	19.8	435.4	497.3	0.7	10,902	601.75
рабочий посёлок Новогуровский	11.8	0.9	5.5	5.4	0.0	3,634	11975.96
Одоевский	1,167.9	307.2	697.8	162.8	0.1	11,908	20.73
Плавский	1,034.3	130.1	648.8	255.4	0.0	29,517	781.49
Суворовский	1,062.5	492.9	470.9	96.3	2.5	35,365	6808.94
Тёпло- Огарёвский	1,011.1	89.3	680.3	241.5	0.0	11,227	4.65
Узловский	611.8	40.2	351.4	218.3	2.0	76,844	2178.23

Чернский	1,615.5	196.1	1,062.5	356.9	0.0	18,793	176.68
Ясногорский	1,298.4	358.3	681.1	257.8	1.2	30,893	389.54
Щёкинский	1,383.9	185.6	877.5	318.9	1.9	105,824	6701.34
город Тула	1,306.5	377.8	688.5	238.0	2.2	548,623	56318.53
Всего:	25435.4	4571.0	14104.1	6734.8	25.5	1 531 876	109 954

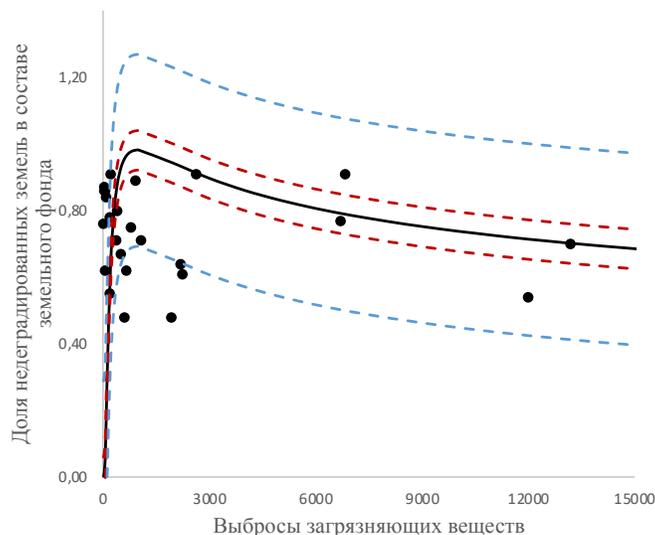


Рис. 3. Зависимость доли недеградированных земель в составе земельного фонда Тульской области с учетом доли земель, не определенных дистанционными методами, от общего количества выбросов: точки — экспериментальные данные, линия — расчет по модели (1)

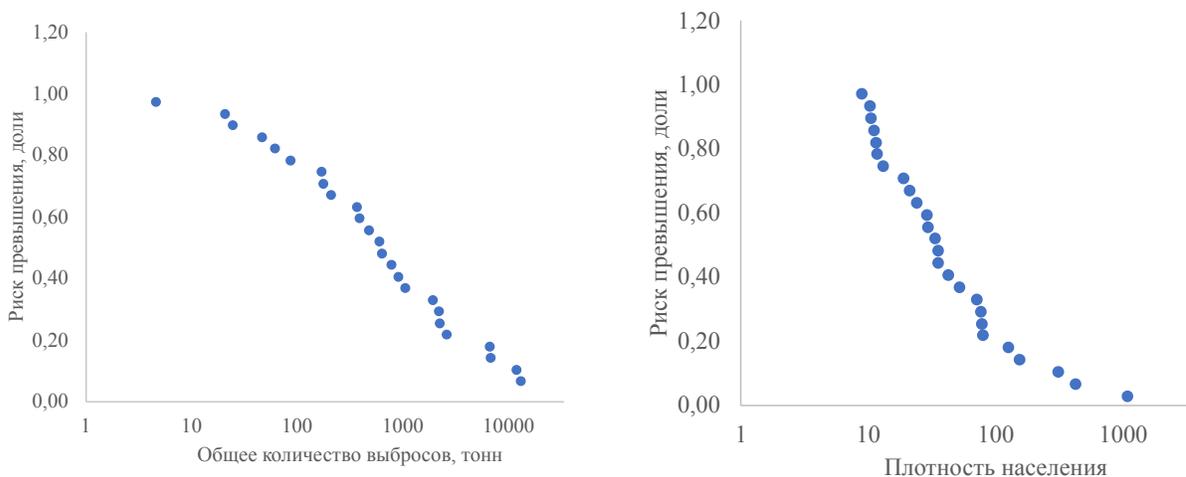


Рис. 4. Оценка рисков деградации земель для всей территории Тульской области по показателю: А) Общее количество выбросов в атмосферный воздух, тонн; Б) Плотность населения, человек на км².

На графике (рис. 4 А) видно, что пороговая величина общего количества выбросов от стационарных источников, равная 959 тонн, соответствует $p = 0.40$. Таким образом, вероятность превышения пороговой величины общего количества выбросов в атмосферный воздух составляет 40%.

Сходный результат был получен при оценке рисков превышения пороговой величины плотности населения в Тульской области (рис. 4 Б). Рост плотности населения свыше 42 человек на км² приведет к постепенному снижению доли недеградированных земель в составе земельного фонда области. Вероятность превышения пороговой величины по состоянию на 2020 г. составляет 41%. Согласно данным Росстата (<https://rosstat.gov.ru>), плотность населения Тульской области по состоянию на 1 января 2012 г. составляла 60 чел. • км⁻².

Риск превышения пороговой величины по обоим показателям характерен для 38 % административных единиц Тульской области.

Выводы

По результатам исследования за опорный период с 2001 по 2020 гг. впервые построена электронная карта экологического состояния земель Тульской области на основе характеристик первичной продукции фотосинтеза, выведенных из материалов дистанционного зондирования Земли из космоса в форме показателей «продуктивности», трансформации земель и динамики содержания органического вещества в почве и обобщающего их индикатора деградации земель ЦУР 15.3.1. В качестве конечного продукта, полученного анализом данных дистанционного зондирования за длительный промежуток времени (с 2001 по 2020 гг.), получена результирующая таблица площадей земель: улучшающихся, стабильных, ухудшающихся с течением времени и не установленного качества. По результатам обобщения этого материала установлено, что в составе земельного фонда Тульской области, общей площадью 25,435 км², к категории деградированных на конец 2020 г. относятся 6734 км², что составляет 26.5% территории. В то же время 55.5% территории заняты землями из категории стабильных, не изменившихся в течение последних 19 лет. Примерно 18% территории относится к землям улучшившимся.

Установлена статистически достоверная нелинейная закономерная связь индикатора экологического состояния земель (в форме показателя доли недеградированных земель) со значениями плотности населения в муниципальных образованиях Тульской области, а также с величиной общего количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников, расположенных на территории района.

На уровне территориальной единицы Тульской области установлены пороговые величины плотности населения и общего количества выбросов в атмосферный воздух от стационарных источников, составившие 42 чел./км² и 959 кг/км² соответственно.

Для территории Тульской области вероятность превышения пороговой величины общего количества выбросов в атмосферный воздух от стационарных источников составляет 40%. Риск роста деградации земель с ростом объемов выбросов характерен для 38% территориальных Тульской области.

Таким образом, создана основа для оценки будущего состояния земель Тульской области по данным космического мониторинга в виде базы данных начальных значений индикатора деградации земель ЦУР 15.3.1 за базовый период с 2001 по 2020 гг.

Литература

- Андреева О.В., Куст Г.С. (2020) Оценка состояния земель в России на основе концепции нейтрального баланса их деградации. *Известия РАН. Сер. Географическая* **84**, **5**. <https://doi.org/10.31857/S2587556620050052>
- Глазунов Г.П., Гендугов В.М., Евдокимова М.В. и др. (2019) Макроскопическая кинетика временной и пространственной изменчивости вегетационного индекса NDVI на территории заповедника «Ямская степь» в условиях загрязнения почвы тяжелыми металлами. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* **16**, **2**. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-111-127>
- Евдокимова М. В. (2023) Прогноз экологического состояния земель субъектов Российской Федерации в целях устойчивого развития. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение* **78**, **2**, 63–74.
- Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей ООН 25.09.2015 г. A/RES/70/1 «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 г.» (Электронный ресурс). 2015. URL: https://www.unfpa.org/sites/default/files/resource-pdf/Resolution_A_RES_70_1_RU.pdf
- Cui Y.P., Liu J.Y., Hu Y.F. et al. (2012) An Analysis of Temporal Evolution of NDVI in Various Vegetation-Climatic Regions in Inner Mongolia, China. *Procedia Environmental Sciences* **13**.
- Eckert S., Hüsler F., Liniger H. et al. (2015) Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. *Journal of Arid Environments* **113**.
- Gonzalez-Roglich M., Zvoleff A., Noon M. et al. (2019) Synergizing global tools to monitor progress towards land degradation neutrality: Trends.Earth and the World Overview of Conservation Approaches and Technologies sustainable land management database. *Environmental Science & Policy* **93**.
- Li Q. et al. (2016) Quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification processes on the Qinghai-Tibet Plateau based on net primary productivity. *CATENA* **147**, 789–796. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.09.005>.

- Nouri H., Beecham S., Anderson S. et al. (2014) High Spatial Resolution WorldView-2 Imagery for Mapping NDVI and Its Relationship to Temporal Urban Landscape Evapotranspiration Factors. *Remote Sensing* **6(1)**.
- Pan N. et al. (2018) Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening: Insights from time-varying trends. *Remote Sensing of Environment* **214**, 59–72.
- Sims N.C., England J.R., Newnham G.J. et al. (2019) Developing good practice guidance for estimating land degradation in the context of the United Nations Sustainable Development Goals. *Environmental Science & Policy* **92**.
- Trends.Earth. Conservation International. (Электронный ресурс). (2018). URL: <http://trends.earth/docs/en/> (дата обращения: 15.04.2021 г.)
- Tucker C.J. (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens Environ* **8, 2**.
- Wessels K.J. et al. (2012) Limits to detectability of land degradation by trend analysis of vegetation index data. *Remote Sensing of Environment* **125**.
- Zoungrana B.J.B. et al. (2018) MODIS NDVI trends and fractional land cover change for improved assessments of vegetation degradation in Burkina Faso, West Africa. *Journal of Arid Environments* **153**.

ТЕЗИСЫ КОНФЕРЕНЦИИ

“SOIL SKILLS” AND “SOIL JUDGING” CONTESTS AMALGAMATED: PEDAGOGICAL ADVENTURE IN BSc FIELD PRACTICUM

Said Al-Ismaily, Anvar Kacimov, Ahmed Al-Mayhai, Hamed Al-Busaidi, Daniel Blackburn,
Afrah Al-Shukaili, Ali Al-Maktoumi, Buthina Al-Siyabi, and Jamal Al-Habsi

Sultan Qaboos University, Oman

Keywords: Soil Science BSc Curriculum; Active – Interdisciplinary - Problem-Based Learning; Soil Skills Contest; Competition.

The intricate nature of soil, characterized by its multifaceted interactions with the Earth's atmospheric, biospheric, hydrospheric, lithospheric, ecospheric, and anthropospheric components, necessitates a comprehensive understanding among soil science professionals and students pursuing soil science and related BSc programs. This understanding is imperative not only for mastering soil science but also for fostering multidisciplinary collaboration essential in addressing the complex, interlinked challenges presented by these systems. The evolving demands of the 21st century, particularly in areas encompassing soil science, water sciences, hydrogeology, geology, agronomy, geotechnical engineering, sedimentation, waste management, recycling, and environmental management, require an educational paradigm that equips students with an integrated skill set comprising theoretical knowledge, practical proficiency, and adaptive thinking.

Responding to this educational imperative, our study advocates for the integration of the "Soil Skills" (SSK) pedagogical framework with the "Soil Judging Contest" (SJC), the former launched in Oman by Sultan Qaboos University in 2016 and the latter implemented by the American Society of Agronomy and the Soil Science Society of America since 1961 and by the V.V. Dokuchaev Soil Science Society and Moscow State University (see e.g. <https://soil.msu.ru/obrazovanie/polevye-praktiki>), among other national soil societies and HEIs having soil programs. This amalgamation aims to transcend traditional pedagogical boundaries, furthering an interdisciplinary, holistic approach to soil science education that is both engaging and contextually relevant. As an example of the latest 2024 SSK (January 2024) we report several new (as compared with Al-Ismaily et al., 2023) tasks formulated and executed by the two participating students; competing teams: blitz-design of a solonchak area in a coastal urban district of Muscat, deciphering of “pedological messages” prepared by the course instructors, a “forensic study” of a hypothetical crime committed in the vicinity of an excavated pedon.

Our methodology involves a rigorous analysis of the SSK approach, an in-depth exploration of the SJC's key components, and a comparative assessment of their synergistic potential. Through this analysis, the study underscores the efficacy of combining the SSK and SJC methods, revealing significant enhancements in student engagement, academic

performance, and practical problem-solving abilities. Our empirical evidence illustrates the positive impact of this integrative approach on students' verve-stimulated comprehension and application of soil science concepts.

The study delineates the strengths of the SSK framework, highlighting its prospective operability in future pedagogical contexts. Our findings reinforce the unique value of the SSK and SJC fusion, which provides a comprehensive, problem-based learning experience that aligns seamlessly with multidisciplinary applications. This innovative educational approach not only prepares students for the complexities of their future professional roles but also enables the effective translation of soil science knowledge into real-world scenarios.

References

Al-Ismaily, S., Kacimov, A., Al-Mayhai, A., Al-Busaidi, H., Blackburn, D., Al-Shukaili, A. and Al-Maktoumi, A., (2023). The “Soil Skills” Pedagogical Approach Conjugated With Soil Judging Contests. *Spanish Journal of Soil Science* **13**, 12081.

MOISTURE-VEGETATION RELATIONSHIPS OF LINEAR ARID DUNES; ASH SHARQIAH HIGH SANDS, OMAN

A. Al-Shukaili¹, A.R. Kacimov¹, A. Al-Mayahi¹, S. Al-Ismaily¹, A. Al-Maktoumi^{1,2}, H. Al-Busaidi¹, D. Menezes-Blackburn¹

¹Department of Soils, Water and Agricultural Engineering, Sultan Qaboos University, Oman

²Water Research Center, Sultan Qaboos University, Oman

The occurrence of scattered vegetation on the topsoil of Ash Sharqiah Sands, Oman despite the limited-sporadic rainfall pattern (<50 mm/year, 80% of it evaporates), deserves special attention. Even under harsh desert environment, still, sparse vegetation survives on the dunes' slopes and interdunal areas (Breckle et al., 2008; Rosenthal, 2005; Tielbörger, 1997). Understanding the interplay between the vegetation spatial patterns and the soil moisture in sand dune areas is important as it determines the ecohydrology of the desert environment and so, it helps to understand the moisture redistribution underneath the sand dunes. The objective of this study was to investigate the relation between soil moisture dynamics and vegetation cover at the top sand layer along a transect (mini-catena) of a sand dune. The diurnal pore water motion was studied in Ash Sharqiah Sands (linear dunes separated by valleys, 1-2 km apart, the water table depth in wells located in the interdunal area is about 50 m under the valley, as of December 2018). Vegetation pattern, density, and distribution were explored and described in plots of 400 m², upper and lower parts of the dune slope (Fig. 1. a, b). Measurements of volumetric moisture content Θ were taken by 5TE sensors (Decagon Devices) inserted at three different depths (5, 15, and 25 cm) across four different locations (up-crest, crest, slope, and interdunal area), at an interval of 125 m. Results have shown that denser and greener shrubs exist at the upper part of the dune slope compared to the lower part (Fig. 1. a). Values of Θ were relatively higher at the top 15 cm and at the interdunal area compared with other depths and locations (Fig. 2). The tempo-spatial variation of Θ along with the root morphology could explain the pattern of vegetation in the desert environment.

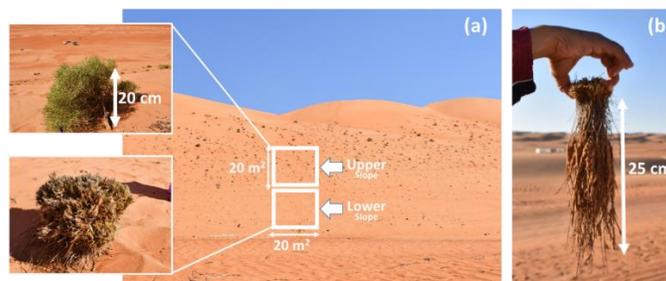


Fig.1. a) The dune's slope was divided into two plots (upper slope, and lower slope) and the vegetation cover was described, b) Observation of roots' morphology of a shrub.

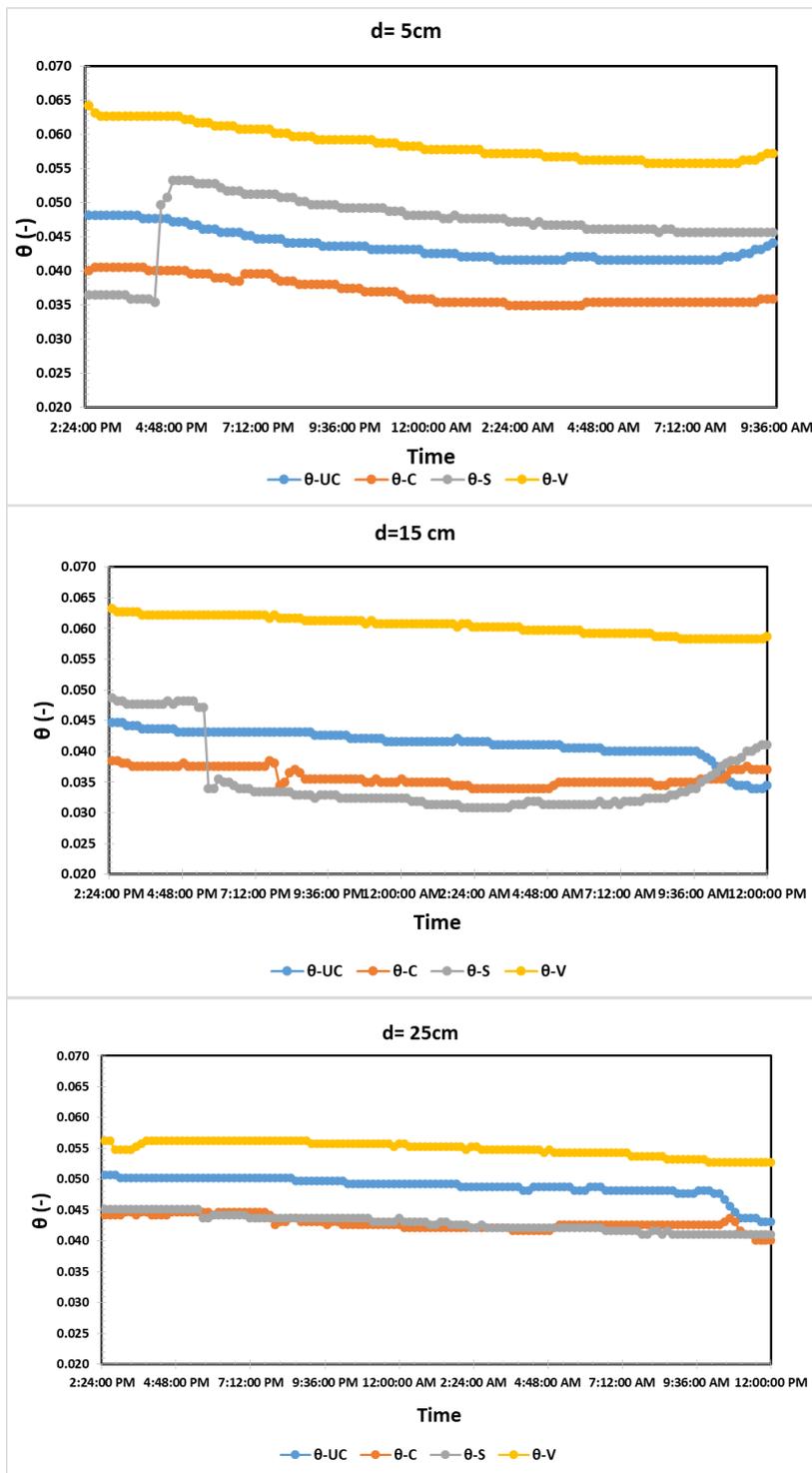


Fig. 2. Moisture content diurnal variation at depths: 5, 15, 25 cm (θ -UC: Upper part of the crest, θ -C: lower part of the crest, θ -S: slope, θ -V: interdunal area)

References

- Breckle, S. W., Yair, A., & Veste, M. (Eds.). (2008). Arid dune ecosystems: the Nizzana sands in the Negev desert (Vol. 200). Springer Science & Business Media.
- Tielbörger, K. (1997). The vegetation of linear desert dunes in the north-western Negev, *Israel. Flora*, **192**(3), 261-278.
- Rosenthal, D. M., Ludwig, F., & Donovan, L. A. (2005). Plant responses to an edaphic gradient across an active sand dune/desert boundary in the Great Basin Desert. *International Journal of Plant Sciences*, **166**(2), 247-255.

IMPACT OF BIOCHAR, ORGANIC FERTILIZERS AND ELEMENTAL SULFUR ON THE EMISSION OF GREENHOUSE GASES FROM AN OMANI CALCAREOUS SOIL

Blackburn, D.M.^{1,*}, Al-Maghatasi¹, B.K., Al-Ismaily, S.¹

¹ Department of Soils, Water and Agricultural Engineering, Sultan Qaboos University, P.O. Box 34, Al-Khoud 123, Oman.

*danielblac@squ.edu.om

Changes in farming practices have the potential for either mitigating or even increasing greenhouse gas (GHG) emissions. Since GHS are mostly emitted from soils through microbial processes, the primary strategy for mitigating GHS emissions involves modifying soil microbial activity to alter the greenhouse gas emission pattern. In practice, the main tool to achieve this is the use of soil amendments such as biochar. This study was designed to assess the effects of the individual or combined application of elemental sulfur, biochar, and compost on soil organic carbon turnover, microbial activity, greenhouse gas emissions, and soil fertility and health. An agricultural field experiment consisting of eight treatments, each replicated four times, was conducted at the experimental station of Sultan Qaboos University.

Greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, and N₂O) were monitored daily during the first two months. After this period, soil samples were randomly collected from each plot, and microbiological analyses were performed to characterize the microbial community and the activity responsible for these emissions. Dehydrogenase activity, which is associated with the soil carbon cycle, urease enzyme activity, which is directly linked to the soil nitrogen cycle, and other analyses were conducted to understand the effect of soil amendment on controlling soil greenhouse gas emissions. The GHG emission results indicated that the use of elemental sulfur significantly reduced the cumulative emissions of CO₂, CH₄, and N₂O compared with the control treatment. In addition, date palm biochar decreased greenhouse gas emissions relative to the control treatment. The combined application of elemental sulfur and biochar further reduced CO₂ and CH₄ emissions compared to the plots with biochar and elemental sulfur alone. However, the combination of elemental sulfur and biochar increased N₂O emissions by approximately eight times compared to sulfur plots and three times compared to biochar plots. The combined application of compost with biochar or elemental sulfur resulted in a slight increase in CO₂ emissions compared with compost treatments alone, which exhibited higher cumulative N₂O emissions than the other plots. The results of our study also indicate that the application of biochar and compost in combination could be adopted as a sustainable agronomic strategy, and that the addition of elemental S acts as a microbial modulator to reduce GHG emissions.

УДК 631.4

ORGANIC MATTER INCORPORATION IN SOILS: PROMOTING SUSTAINABLE AGRICULTURE AND CLIMATE CHANGE MITIGATION

Ming Hung Wong¹

¹Soil Health Laboratory, Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
minghwong@eduhk.hk

²Consortium on Health, Environment, Education, and Research (CHEER), The Education University of Hong Kong, Hong Kong, China
minghwong@eduhk.hk

Abstract

The utilization of organic matter for soil amendment in agriculture has a longstanding historical background involving diverse materials such as animal manure, crop residues, compost, biosolids, and biochar. Incorporating organic matter into soil enhances soil structure, fertility, and sustainability in agricultural practices. This paper comprehensively examines the benefits of organic matter incorporation, including improvements in physical properties such as soil structure, porosity, and aeration. These improvements result in enhanced water-holding capacity, reduced erosion, and mitigation of soil compaction. Furthermore, organic matter significantly influences the chemical properties of soil, regulating pH, buffering against extreme acidity or alkalinity, and enhancing nutrient reserves, availability, and cation exchange capacity. These enhancements promote root development, nutrient uptake, and overall plant performance, fostering plant growth. In addition, adding organic matter creates a favorable environment for beneficial microorganisms like mycorrhizal fungi and soil bacteria, establishing symbiotic relationships with plants. This symbiosis facilitates nutrient mineralization, disease suppression, and plant stress tolerance. Moreover, incorporating organic matter is crucial in climate change mitigation. It contributes to carbon sequestration, reduces greenhouse gas emissions, and enhances soil resilience, offering a promising strategy for sustainable agriculture. Recognizing the significance of organic matter incorporation and embracing sustainable agricultural practices can contribute to resilient agriculture and global efforts to address climate change.

Acknowledgements

The study was carried out in the laboratory «Soil Health» of the Southern Federal University with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement no. 075-15-2022-1122.

ПОЛЕВАЯ ЭЛЕКТРОФИЗИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УРБАНОЗЁМОВ

Позднякова Л.А.¹, Раппопорт А.В.², Трубин А.Ю.³, Орунбаев С.^{4,5}, Умарова А.Б.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

²Ботанический сад МГУ, Москва, Российская Федерация

³Ландвайзер ООО, Прага, Чехия

⁴Американский Университет в Центральной Азии, Бишкек, Кыргызстан

⁵Ошский Государственный Университет, Ош, Кыргызстан

geoprofp@yandex.ru

FIELD ELECTROPHYSICS FOR STUDYING URBAN SOILS

Pozdnyakova L.A.¹, Rappoport A.V.², Trubin A.Y.³, Orunbaev S.^{4,5}, Umarova A.B.¹

¹Department of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russia

²Botanical Gardens, Moscow State University, Moscow, Russia

³Landviser s.r.o., Prague, Czech Republic

⁴American University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan

⁵Osh State University, Osh, Kyrgyzstan

Annotation: Methods measuring soil electrical resistivity - vertical electrical sounding, 2D electrical tomography, and horizontal electrical profiling were applied to study the structure, composition, and water content of urban soils around the world. Those methods can be used to solve various problems related to urban planning, construction, landscaping, and environmental protection.

В данной работе представлены методы контактной многоэлектродной электроразведки, которые в последнее время всё более широко применяются для изучения статических и динамических свойств, как естественных почв, так и почв, измененных хозяйственной деятельностью человека и искусственных почвоподобных субстратов. Электрические методы пришли в физику почв из глубинной геофизики и начиная с 60-х годов прошлого века успешно применялись на кафедре физики и мелиорации почв МГУ имени М.В. Ломоносова Вадюниной А.Ф., Карпачевским Л.О., Березиным П.Н. и другими. Благодаря многолетней научной работе профессора кафедры Позднякова А.И. (1,2) сформировалась научная школа почвенной электрофизики, были адаптированы геофизические приборы и методы из глубинной электроразведки для решения задач почвоведения, сельского хозяйства и строительства. Однако, интенсивное внедрение электрофизических методов для изучения почв долгое время сдерживалось отсутствием удобного и универсального инструмента. Это проблема во многом была решена около 20 лет назад благодаря разработке прибора Landmapper, который позволяет измерять электрическое

сопротивление почв как в лабораторных, так и в полевых условиях (3–5), причем глубина и объём измеряемого слоя зависит только от расстояния между электродами и геометрии электродных установок. Целью настоящей работы явился анализ различных методических подходов по измерению удельного электрического сопротивления (УЭС) почв этим прибором: измерения по вертикальным стенкам разрезов и горизонтальным площадкам, горизонтальное электрическое профилирование (ГЭП) и картирование верхнего 20-50 см слоя почв, вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) до глубины 7-20 м и даже детальная 2Д электротомография изменений почвенных типов в катенах и искусственных городских ландшафтах. Метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) позволил определить текстуру и состав погребенных слоев почвы, а также уровень верховодки и динамику почвенной влажности в парках и ботанических садах городов Москвы и Бишкека. С помощью измерения УЭС по стенке разрезов в урбанозёмах московских парков Эрмитаж и Зарядье удалось идентифицировать остаточный подзолистый горизонт, подсыпку торфяного субстрата на газоне и погребенный подзолистый оглеенный горизонт на глубине более 2 м. Мониторинговые исследования в парке Карагачева Роща г. Бишкека позволили следить за динамикой подтопления и разработать методики интерпретации данных ВЭЗ с использованием программ iVEZ и Res1D (6,7). Наиболее детальным методом УЭС является 2Д томография. Разработанная 3х-слойная дипольно-дипольная конфигурация с дробным увеличением n-фактора обеспечивает простоту при ручном переключении 4х-электродных комбинаций и высокую плотность данных, что позволяет получить подробные изображения подпочвенных слоев до глубины 14 м. Для инверсии и визуализации полученных данных в 2Д разрезы УЭС использовалась программа Res2DInv, что дало возможность получить детальную характеристику подпочвенных слоев различной текстуры в различных типах почв, что было ранее апробировано на почвах разных стран (Австрия, Мексика). Показано, что для городских почв применение 2Д томографии перспективно для поиска мест, подходящих для строительства фундаментов, а также для локализации подпочвенных коммуникаций и других урбаногенных неоднородностей.

Таким образом, методы электроразведки, основанные на измерениях электрического сопротивления, зарекомендовали себя как эффективный инструмент для изучения урбанозёмов. Они позволяют получить информацию о структуре, составе, динамике влажности и других характеристиках почвы, что имеет важное значение для решения различных задач, связанных с городским планированием, строительством, благоустройством и охраной окружающей среды.

Список Литературы

Pozdnyakov AI. (2001) Полевая электрофизика почв (Field soil electrophysics) [Internet]. Moscow, Russia: MAIK "Nauka-Interpereodika"

- Поздняков А.И., Позднякова, Л.А., Позднякова АД. (1996) Стационарные электрические поля в почвах (Stationary electrical fields in soils) -In Russian, with English conclusions- [Internet]. Moscow, Russia.: KMK Scientific Press, Available from: <https://tinyurl.com/ym2h4z5s>
- Golovko L, Pozdnyakov A, Pozdnyakova A. (2010) LandMapper ERM-02: Handheld Meter for Near-Surface Electrical Geophysical Surveys. *FastTIMES EEGS. Agriculture: A Budding Field in Geophysics* **15(4)**, 85–93.
- Pozdnyakova L, Oudemans PV, Pozdnyakov AI, Kelly MS. (2004) LandMapper™ ERM-01. Electrical resistivity mapping device for precision horticulture. *In: Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management*, Hyatt Regency, Minneapolis, MN, USA, 25-28 July, p. 381–97.
- Позднякова Л.А. (2017) LandMapper® ERM-03 /04. Теория электрических измерений почв и Руководство пользователя [Internet]. ИП «ГеоПро» Позднякова Л.А.; 29 p. Available from: <https://tinyurl.com/bdhdnzvw>
- Loke MH. (2010) Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys [Internet]. Geotomo Software, Inc. Available from: <https://tinyurl.com/53sy6pvm>
- Поздняков А.И., Ковалев Н.Г., Позднякова А.Д. (2002) Электрофизика в почвоведении, мелиорации, земледелии (Electrophysics in soil science, reclamation, agronomy). Tver': ЧуДо; 280 p.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ FIB-SEM ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ

Романенко К.А.¹, Толстыгин К.Д.^{1,2}, Силаев М.В.², Герке К.М.²

¹Почвенный институт имени В.В. Докучаева, Москва, Российская Федерация

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

romanenko_ka@esoil.ru

USING FIB-SEM TECHNOLOGY TO STUDY THE NANOSTRUCTURE OF LOAMY SOILS

Romanenko K.A.¹, Tolstygin K.D.^{1,2}, Silaev M.V.², Gerke³

¹V.V. Dokuchaev Soilsience Institute, Moscow, Russian Federation

²MSU Soilsience Faculty, Moscow, Russian Federation

Annotation: The paper presents a new approach to studying the structure of soils at the nanoscale using scanning electron microscopy with focused ion beam cutting. This approach allows us to obtain easily interpretable data on the natural nano-organization of the solid phase of soils, to separate the pores, mineral and organic phases and to evaluate the structure morphometrically.

Структура почвы определяется многими физическими свойствами и функциями. Если известна подробная информация о структуре, можно использовать ряд методов моделирования для выполнения имитационных расчетов с целью оценки физических свойств почвы и их оценки в различных масштабах, которые невозможно измерить иным способом, или для прогнозирования изменений, связанных с изменением граничных условий. Благодаря широкому распространению рентгеновской компьютерной томографии (ХСТ) стало возможным описать структуру почвы в микромасштабе. Однако теперь очевидно, что такая характеристика не является точной.

этого достаточно, чтобы описать все необходимые процессы или свойства почв, поскольку подробной информации о структуре почвы на наноуровне по-прежнему не хватает. В данной работе представлены первоначальные результаты определения характеристик наноструктуры почв с использованием сфокусированного ионного пучка и сканирующей электронной микроскопии (FIB-SEM). Мы подготовили шлифованные и отполированные поверхности размером $\sim 50 \times 50$ мкм² с помощью технологии FIB-SEM на агрегате чернозёма типичного и дерново-подзолистой почвы.

В дополнение к визуализации методом FIB-SEM с разрешением до 4 нм, мы выполнили обычную визуализацию поверхности методом СЭМ и рентгеноструктурное сканирование с высоким разрешением 1,01 мкм. Изображения,

полученные с использованием трех подходов, показали их различную способность различать структурные особенности в разных масштабах. Изображения, полученные с помощью FIB-SEM, были полезны для характеристики распределения пор по размерам, и мы наблюдали радиусы пор в пределах от 4 нм до ~1 мкм. Мы также наблюдали три основных типа нанопористости: один - между минеральными зёрнами и органоминеральными соединениями, другой - в органическом веществе, а затем в минералах. Мы описали все преимущества и недостатки визуализации методом FIB-SEM, а также предложены практические решения для устранения этих недостатков; кроме того, были намечены будущие направления исследований с использованием FIB-SEM для улучшения характеристик структуры почвы на наноуровне.

В результате проделанной работы намечены дальнейшие направления нашей деятельности:

- 1) Более детальное изучение наноструктуры суглинистых почв, включая увеличение точек опробования, анализ минералогического состава с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS);
- 2) Разрушающая томография для получения трёхмерной структурной информации на наноуровне;
- 3) Сравнение визуализации с помощью FIB-SEM пропитанных эпоксидной смолой образцов и СЭМ-визуализации с обратным рассеянием на полированных поверхностях. (BSIM), который менее трудоёмок и потенциально позволяет получать изображения с более широким полем зрения.
- 4) Разработка методов стохастической реконструкции для облегчения получения детальной трёхмерной информации о структуре почв в наномасштабе на основе 2D-изображений FIB-SEM.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 23-74-00061 на базе оборудования объекта инфраструктуры центра наноматериалов МФТИ.

УДК. 631.4

ВЛИЯНИЕ ГЕЛЬ-ФОРМИРУЮЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОЧВОМОДИФИКАТОРОВ НА АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ И ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР

Садовникова Н.Б.¹, Смагин А.В.¹, Кривцова В.Н.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

smagin@list.ru

THE EFFECT OF GEL-FORMING POLYMER SOIL MODIFIERS ON THE AGROPHYSICAL PROPERTIES OF SOILS AND THE PRODUCTIVITY OF PLANT CROPS

Sadovnikova N.B., Smagin A.V., Krivtsova V.N.
Lomonosov Moscow State University, Soil Sci. Dept.

Annotation: The report summarizes the results of complex field tests of innovative gel-forming soil hydrogels to optimize edaphic properties in modern technologies for growing vegetable crops in open and closed soil conditions with natural precipitation and artificial irrigation using different methods (drip irrigation, furrow application, sprinkling) with field monitoring of water-air, acid-base soil regimes, biological activity (soil respiration), phytomass dynamics and plant productivity. Innovative soil modifiers patented in Russia effectively increase the productivity of tested vegetable crops by 30-50% or more while saving 1.5-2 times irrigation water by reducing its unproductive losses due to infiltration and evaporation while reliably protecting the rhizosphere from pathogenic microflora, including late blight.

Полимерные гель-формирующие почвенные кондиционеры являются перспективным средством оптимизации свойств почвы в современных агротехнологиях. При небольших дозах (0.1-0.3 масс.%) они способны повышать водоудерживающую способность грубодисперсных почв до оптимального уровня легких и средних суглинков, оптимизировать структурное состояние, гидравлическую проводимость, корневое водопотребление и минеральное питание растений, а при использовании встроенных биоцидов - надежно защищать ризосферу от патогенной микрофлоры. Доклад анализирует результаты комплексных полевых испытаний инновационных гель-формирующих почвенных гидрогелей российского производства для оптимизации эдафических свойств в современных технологиях выращивания овощных культур в условиях открытого и закрытого грунтов при естественном увлажнении и искусственном орошении разными способами (капельный полив, напуск по бороздам, дождевание). Приводятся данные мониторинга водно-воздушного, кислотного-щелочного режимов почвы, биологической активности (почвенного дыхания), динамики фитомассы и

урожайности растений под воздействием гель-формирующих почвенных кондиционеров различного химического состава. Выявлена высокая эффективность запатентованных авторским коллективом инновационных почвомодификаторов, повышающих на 30-50% и более продуктивность тестируемых овощных культур при 1.5-2-кратной экономии поливной влаги за счет сокращения ее непродуктивных потерь на внутрпочвенный сток и испарение при надежной защите ризосферы от патогенной микрофлоры, включая фитотфору.

Финансирование

Работа осуществлена в рамках Государственного контракта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-1212 «Разработка и применение инновационных почвенных мелиорантов для повышения продуктивности и предотвращения деградации засушливых земель».

УДК 504.062.4

РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОДОУДЕРЖИВАЮЩИХ СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННЫХ ПЕСКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И ТЕРМОВЕРМИКУЛИТА

Слуковская М.В.¹, Иванова Т.К.¹, Мосендз И.А.¹, Кременецкая И.П.¹, Сачивко Е.П.

¹ Кольский научный центр РАН, г. Апатиты, Россия

Regulation of water-retaining properties of man-made sands using polyvinyl alcohol and thermovermiculite

Slukovskaya M.V., Ivanova T.K., Mosendz I.A., Kremenetskaya I.P., Sachivko E.P.

¹Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Тонкодисперсные материалы техногенного происхождения могут быть использованы в качестве основы для формирования искусственных фитоценозов на территориях с деградированной почвой, но зачастую нуждаются в корректировке гидрофизических свойств. Изучено влияние внесения термовермикулита и 5% раствора поливинилового спирта (ПВС) на гидрофизические свойства почвосмесей на основе материалов, состоящих преимущественно из кварца. Материал СО получен при обогащении железистых руд, СЯ — дроблением вмещающей породы месторождения полиметаллических руд. Также преимущественно песчаным материалом является загрязненный подзол СП, эродированный до горизонта ВНГ. Помимо вермикулита в СЯ вносили торф, суммарное содержание добавок 10 мас.%.
Образцы грунтов выдерживали в эксикаторах над растворами солей при относительной влажности воздуха 75% (насыщенный раствор NaCl) и 33% (насыщенный раствор MgCl₂) при температуре 20±2°С. Влажность почвы определяли периодически по изменению массы образцов и с помощью влагомера SM150.

Материалы СО и СЯ являются щелочными (рН 8,1 и 7,8 соответственно), СП характеризуется повышенной кислотностью (рН 4,2–4,8). СЯ содержит примеси глинистых минералов и сидерита, СО — гематит и магнетит, СП – полевые шпаты. Влажность почвосмесей изменяется по сравнению с исходными материалами по-разному в результате влияния примесей.

Вермикулит снижает влажность СО при обоих значениях влажности среды хранения, снижает влажность СЯ при влажности воздуха 75% и повышает при 33%, влажность СП повышается (при влажности 75%). Добавление вермикулита снижает скорость потери влаги для всех вариантов субстратов. ПВС снижает влажность в результате уплотнения материала, незначительно уменьшает скорость испарения воды и тормозит увядание растений.

С материалом СЯ проведен опыт в полевых условиях. Введение ПВС в почвосмесь отрицательно влияло на биомассу смеси злаков на основе тимофеевки и положительно — на люцерну. На продуктивность смеси на основе овсяницы и райграса ПВС не влиял, добавление в нее люцерны может либо снизить биомассу растений (в варианте субстрата СЯ с 10% вермикулита), либо существенно увеличить (варианты с 10% торфа и 5% вермикулита + 5% торфа).

Введение в техногенный грунт вермикулита способствует снижению скорости испарения влаги. ПВС на данный процесс оказывает незначительное влияние, однако использование данного приема позволит уменьшить пыление грунта, что окажет благоприятное влияние на экологическое состояние природной среды.

Исследование выполнено в рамках гранта РНФ 21-7-10111.

УДК. 631.4

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАСКЛИНИВАЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОСНОВНОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ КРИВОЙ ПОЧВ ВО ВСЕМ ДИАПАЗОНЕ ВЛАЖНОСТИ

Смагин А.В.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
smagin@list.ru

A FUNDAMENTAL MODEL OF THE DISJOINING PRESSURE OF SOIL WATER FOR
THE ENTIRE WATER RETENTION CURVE

Smagin A.V.

Lomonosov Moscow State University, Soil Sci. Dept.

Annotation: The report presents an alternative methodological approach to modeling the water retention curve (WRC), based on the fundamental equations of the Derjaguin disjoining pressure of water films in relation to the soil physical system. A new physically based model, validated on our own and independent literature WRCs data for soils of different genesis and texture from sands to clays, showed good agreement with experimental data with a more adequate description of the WRC in the vicinity of conditionally zero soil moisture compared to the standard empirical van Genuchten model.

Актуальная для компьютерного процессного моделирования энергомассообмена в почвах и ландшафтах задача разработки математических моделей основной гидрофизической характеристики (ОГХ) почв решается в современной физике почв преимущественно на базе эмпирических подходов и педотрансферных функций. При этом априори доминирующим физическим механизмом вододерживания принято считать капиллярность. Доклад представляет альтернативный методологический подход к моделированию ОГХ, основанный на фундаментальных уравнениях отечественной дерягинской школы поверхностных явлений в дисперсных системах, описывающих феномен расклинивающего давление водных пленок применительно к почвенной физической системе с переменной влажностью (W , кг/кг). Новая физически-обоснованная модель, валидированная на собственной и независимой литературной информации по ОГХ почв разного генезиса и дисперсности от песков до глин показала хорошее соответствие экспериментальным данным при более адекватном описании ОГХ в окрестности условно нулевой влажности почв (УНВ) по сравнению со стандартной эмпирической моделью ван-Генухтена (рис. 1(a)). Фундаментальный характер модели позволяет наряду с более точным описанием ОГХ во всем диапазоне варьирования содержания влаги от УНВ (состояние стандартной сушки при 105 °С) до полной влагоемкости оценивать по ОГХ стандартный потенциал воды в

состоянии УНВ (Ψ_0 , Дж/кг), дисперсность (эффективную удельную поверхность) твердой фазы (S_0 , м²/кг), обобщенные константы Гамакера для межфазных взаимодействий почвенной физической системы (A_H , Дж), эффективную дебаевскую толщину (λ , м) двойного электрического слоя (ДЭС), концентрацию (C_0 , моль/м³) и заряд (валентность, z) ионов ДЭС, точку смены кривизны ОГХ (экстремума распределений пор, рис. 1(б)), ассоциированную с наименьшей (полевой) влагоемкостью и ряд других физических и физико-химических показателей, имеющих ключевое значение для термодинамической концепции физического качества почв (Smagin, 2003, 2021).

Форма модели представлена в соответствии с правилом аддитивности термодинамических потенциалов воды (Ψ) линейной комбинацией экспонент (уравнение 1), отражающих вклад наиболее значимых для вододерживания структурной и ионно-электростатической компонент расклинивающего давления по Дерягину с адаптацией к почвенной физической системе с переменной влажностью (Churaev, 2003, Smagin, 2003):

$$\Psi = \Psi_0 \cdot [\exp(-b \cdot W) - \exp(-b)] + \Psi_i \cdot [\exp(-k \cdot W) - \exp(-k)] \quad (1)$$

$$\Psi_0 = Q - f \cdot 378; \quad f = \frac{Q}{T} - R \frac{\ln(rh)}{M} \quad (2)$$

$$S_0 = \frac{\sqrt{2 \cdot \exp(-2)}}{br_0 \rho} \approx \frac{1}{2br_0 \rho} \quad (3)$$

$$A_H = \frac{24\pi\rho\Psi_0 r_0^2}{S_0 b} \quad (4)$$

$$C_0 = \frac{\Psi_i \cdot \rho}{64RT} \quad (5)$$

$$z = \frac{S_0 \rho k}{F} \sqrt{\frac{\xi_0 \xi RT}{2C_0}} = \frac{k}{F b r_0} \sqrt{\frac{\xi_0 \xi RT \exp(-2)}{C_0}} \quad (6)$$

где $r_0 = 1.38 \cdot 10^{-10}$ м – кристаллохимический радиус молекул воды, $\rho = 1000$ кг/м³, $M = 0.018$ кг/моль – плотность и молярная масса воды, $Q = 2401 \pm 3$ кДж/кг – средняя удельная теплота испарения для диапазона температур 0-100°C; $F = 96484.56$ Кл/моль – число Фарадея, $\xi_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, $\xi = 81$ – диэлектрическая проницаемость воды, $R = 8.314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная, T , К – абсолютная температура, 378 (К) – температура стандартной сушки образцов почвы до состояния УНВ, rh – относительная влажность воздуха, Ψ_0 , Ψ_i , b , k – вспомогательные (аппроксимационные) параметры модели (1), связанные с фундаментальными физическими и физико-химическими показателями уравнениями (2)-(6).

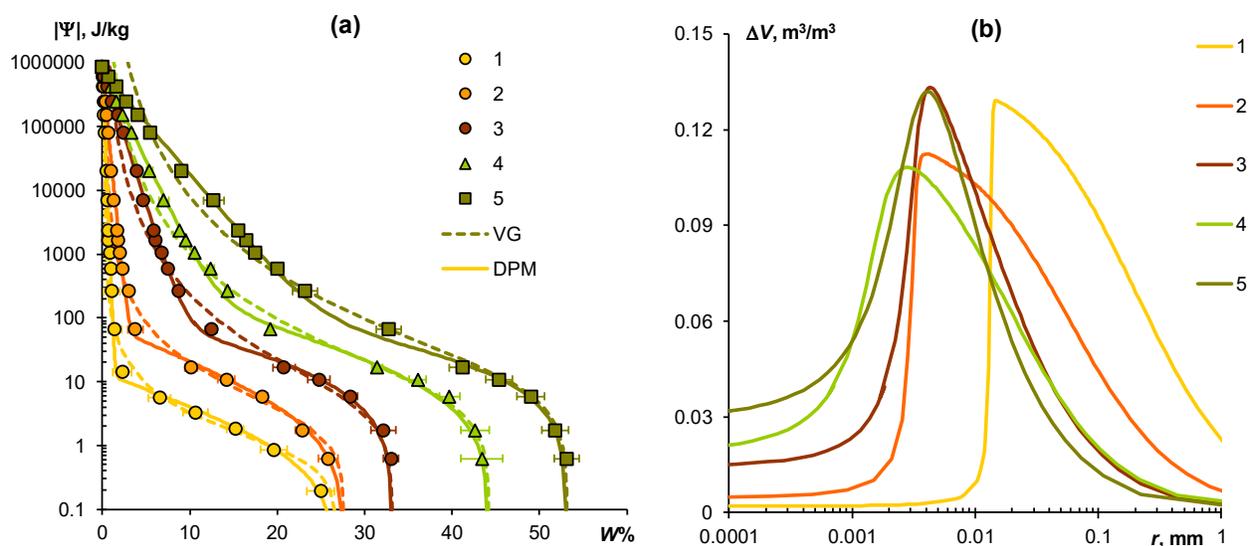


Рис.1. (а) Примеры аппроксимации ОГХ почв разной текстуры (1, 2 – песок, супесь, 2-5 – легкие, средние и тяжелые суглинки) моделями ван-Генухтена (VG) и расклинивающего давления (DPM); (б) распределения объемов пор (V) по их радиусам (r), рассчитанные по DPM.

Финансирование

Работа осуществлена при поддержке РФФ (проект № 23-64-10002).

Литература

- Churaev N.V. (2003) Derjaguin disjoining pressure in the colloid science and surface phenomena. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **104**, 15-20. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(03\)00032-0](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(03)00032-0)
- Smagin A.V. (2003) Theory and methods of evaluating the physical status of soils. *Eur. Soil Sci.*, **36**. 301-312.
- Smagin A.V. (2021) Thermodynamic concept of water retention and physical quality of the soil. *Agronomy*, **11**, ID 1686. 1-24. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091686>

НОВЫЕ ПРОЦЕССЫ МИКРОБНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ АЗОТА КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПОЧВ

Степанов А.Л., Сошникова Е.А., Манучарова Н.А.

ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, stepanov_aleksey@mail.ru

New processes of microbial transformation of nitrogen as a factor in the formation of the soil gas
phase

Stepanov A.L., Soshnikova E.A., Manucharova N.A.
Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University

Во многих типах почв нитрифицирующие археи численно преобладают над бактериями, но отсутствуют данные об их участии в процессах образования и эмиссии закиси азота (N_2O). Цель работы — изучение нитрифицирующих микробных сообществ дерново-подзолистой и серой лесной почв с оценкой их вероятного вклада в образование N_2O .

Выделение ДНК проводили с помощью Ultra Clean Soil DNA Isolation Kit («MoBio», Канада). Очистку выделенного препарата ДНК проводили с помощью коммерческого набора Wizard Genomic DNA Purification Kit в соответствии с протоколом производителя («Promega», США). Амплификацию проводили на приборе MСycler («BioRad», США). Для определения интенсивности выделения закиси азота образцы почвы массой 5 г помещали в пенициллиновые флаконы, увлажняли водным раствором $(NH_4)_2SO_4$ (из расчета 0,3 мг N/г почвы), закрывали резиновыми пробками и вводили ацетилен, достигая парциального давления 10 Pa, что достаточно для ингибирования аэробного окисления аммония протеобактериями (Prosser, Nicol; 2009). В этой концентрации C_2H_2 не оказывает влияния на активность таумархеот, так как окисление аммония у них осуществляется с участием иной ферментной системы (Kozlowski et al.; 2016). Активность денитрификации оценивали традиционным методом – по эмиссии N_2O в присутствии ацетилена (10 kPa) (Webster, Hopkins; 1996); вклад таумархеот в поток закиси азота из почв по отношению к контролю определяли по разности между вариантами с введением ацетилена (10 Pa и 10 kPa). Газовые пробы отбирали с интервалом, равным 20 ч. Скорость накопления закиси азота в газовой фазе над образцами почв оценивали на газовом хроматографе.

Оценка вклада таумархеот в газообразные потери азота в форме N_2O в дерново-подзолистой почве показала, что закись азота обнаруживается только в микрокосмах с аммонием и ацетиленом (10 Pa), т.е. детектируется только архейная нитрификация. В образцах с аммонием без ацетилена (ожидалось проявление

активности аммонийоокисляющих бактерий) образование закиси азота за период эксперимента не обнаружено. В контрольной почве (без добавления аммония) в присутствии ацетилена (10 Pa) закись азота также не выделялась: в этих условиях автотрофная нитрификация ингибируется, а денитрификаторы не развиваются за непродолжительный промежуток времени во время эксперимента из-за отсутствия достаточного количества нитратов.

Результаты амплификации фрагментов гена amoA архей и бактерий согласуются с данными других исследователей о доминировании архейных генов над бактериальными в почвах ненарушенных экосистем по сравнению с агроценозами с относительно высокими показателями обилия и активности аммонийоокисляющих бактерий. По разности между активностью денитрификации в серой лесной почве и выделением закиси азота после внесения аммония и ингибирования аммонийоокисляющих бактерий ацетиленом (10 Pa) была сделана оценка вклада аммонийоокисляющих архей (АОА) в эмиссию N_2O , что составило 20—25% от общего потока закиси азота из исследованных почв.

УДК 631.4

ЭМИССИЯ CO₂ ПОЧВОЙ, ОБРАБОТАННОЙ ГЛИОТОКСИНОМ

Тесля А.В., Гурина Е.В., Яшников А.В., Степанов А.А., Васильченко А.С.

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия, a.v.teslia@utmn.ru

CO₂ emissions from gliotoxin-treated soil
Teslya A.V., Gurina E.V., Yashnikov A.V., Stepanov A.A., Vasilchenko A.S..
Tyumen State University

Существует множество факторов, связанных с выращиванием полевых культур, которые способствуют эмиссии CO₂ из почвы. Одним из таких факторов является применение пестицидов на полях с целью борьбы с вредителями культур и повышения урожайности. Именно пестицидам во многом обязано современное сельское хозяйство своими успехами. Однако, использование больших объемов химикатов привело к развитию высокоуглеродного земледелия. Сегодня мировое хозяйство заинтересовано в развитии низкоуглеродных сельскохозяйственных технологий, в частности, в создании биопестицидов. Низкоуглеродное земледелие, с точки зрения охраны окружающей среды, является эффективной стратегией управления земельными ресурсами, так как основаны на низком уровне загрязнения, низких выбросах углерода, на улавливании и хранении углерода.

Глиотоксин – хорошо известный вторичный метаболит, продуцируемый *Trichoderma spp.*, впервые открытый еще в 1930-х годах. В биологической защите растений глиотоксин рассматривается в качестве биопестицида, поскольку обладает бактерицидными, фунгицидными, фунгистатическими свойствами против фитопатогенов. Однако, биоконтроль – это не только растение – патоген – агент биоконтроля. Необходимо учитывать более сложные взаимодействия с почвенной средой. Важно понимать, будет ли этот агент биоконтроля соответствовать требованиям низкоуглеродной технологии.

В рамках представленной проблемы проведена оценка влияния различных доз глиотоксина на выделение CO₂ из почвы. Глиотоксин вносили в почву (дерново-подзолистые) в концентрациях 500 мкМ, 100 мкМ, 50 мкМ, 25 мкМ и 10 мкМ. Контролем послужила почва без глиотоксина. Для определения скорости выделения CO₂ использовался газоанализатор LI-830 (LI-COR Biosciences, США). Определяли выделение CO₂ почвами на 1, 30, 60 и 90 дни после внесения биопрепарата.

Уже через 24 часа инкубации выделение CO₂ увеличилось в образцах с ГТ в среднем в 1,4 раза по сравнению с контролем. Стимуляция выделения CO₂ из обработанных почв продолжалась на 30-й день, но начала снижаться в образцах с

концентрациями глиотоксина 25 мкМ и 10 мкМ. Подобная тенденция сохранилась и на 60-й день инкубации. Через три месяца эксперимента (90-й день) в почвенных образцах с низкими концентрациями глиотоксина скорость выделения CO_2 приближалась к контрольным значениям. В пробах с 100 мкМ глиотоксина базальное дыхание снизилось на 61,2 % относительно предыдущей точки отбора. По сравнению с другими концентрациями глиотоксина и контролем (выше в 2,2 раза, $p < 0,005$) выделение CO_2 продолжало оставаться на высоком уровне только в образцах с 500 мкМ.

Таким образом, использование глиотоксина в низких концентрациях, но подавляющих фитопатогены, соответствует требованиям низкоуглеродной технологии.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке РФФ 23-24-00648 «Особенности функционирования микробного сообщества и ферментативной активности почв при воздействии глиотоксина почвенных грибов».

УДК 631.421.2

АПРОБАЦИЯ НА ТРЁХ МОДЕЛЯХ УГЛЕРОДА КОНСТРУКТОРА МОДЕЛЕЙ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА

Файкин Г.М.¹, Степаненко В.М., Медведев А.И., Шангареева С.К.

¹ Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ, Москва, Российская
Федерация,
E-mail: Egorc16@mail.ru

TESTING ON THREE CARBON MODELS OF THE CARBON CYCLE MODEL DESIGNER

Faykin G.M.¹, Stepanenko V.M., Medvedev A.I., Shangareeva S.K.

¹ Research Computing Center of Moscow State University, Moscow, Russian Federation,
E-mail: Egorc16@mail.ru

Annotation: The paper examines the universal designer of models of the carbon cycle in soil and vegetation (NIVC), created within the framework of the numerical model of the active land layer of the Institute of Computational Mathematics of the Russian Academy of Sciences-MSU. To check the performance and quality of the results obtained, the designer is tested on carbon models: SOCS, ROTHC, the INM RAS - MSU model.

Введение

В рамках конструктора моделей углеродного цикла [1] реализованы следующие модели: модель баланса почвенного углерода SOCS, модель ROTHC, модель ИВМ РАН – МГУ. Для верификации и калибровки моделей, привлечены данные Долгопрудненской опытной станции и опыт Ростовского ФАНЦ. В эксперименте с данными подмосковной станции проведена калибровка параметров. Оценено качество моделей при сравнении с натурными данными.

Объекты и методы

Использованные данные

Для верификации и калибровки моделей привлечены данные [2].

Опыт Долгопрудненской опытной станции (Московская область) «Эффективность возрастающих доз минеральных удобрений» (ДАОС 3). Опыт Ростовского ФАНЦ (Ростовская область) «Эффективность минеральных и органических удобрений в зависимости от насыщенности ими севооборота».

Поступление в почву углерода в виде органических удобрений и растительных остатков было задано по данным измерений. Шаг модели по времени составил 1 ч. Оценка параметра, характеризующего углерод-протекторную емкость черноземов основана на литературных данных [3], [4].

Использованные модели

модель SOCS [5],
модель RothC [6],
модель ИВМ РАН МГУ [7], [8].

Результаты и обсуждение

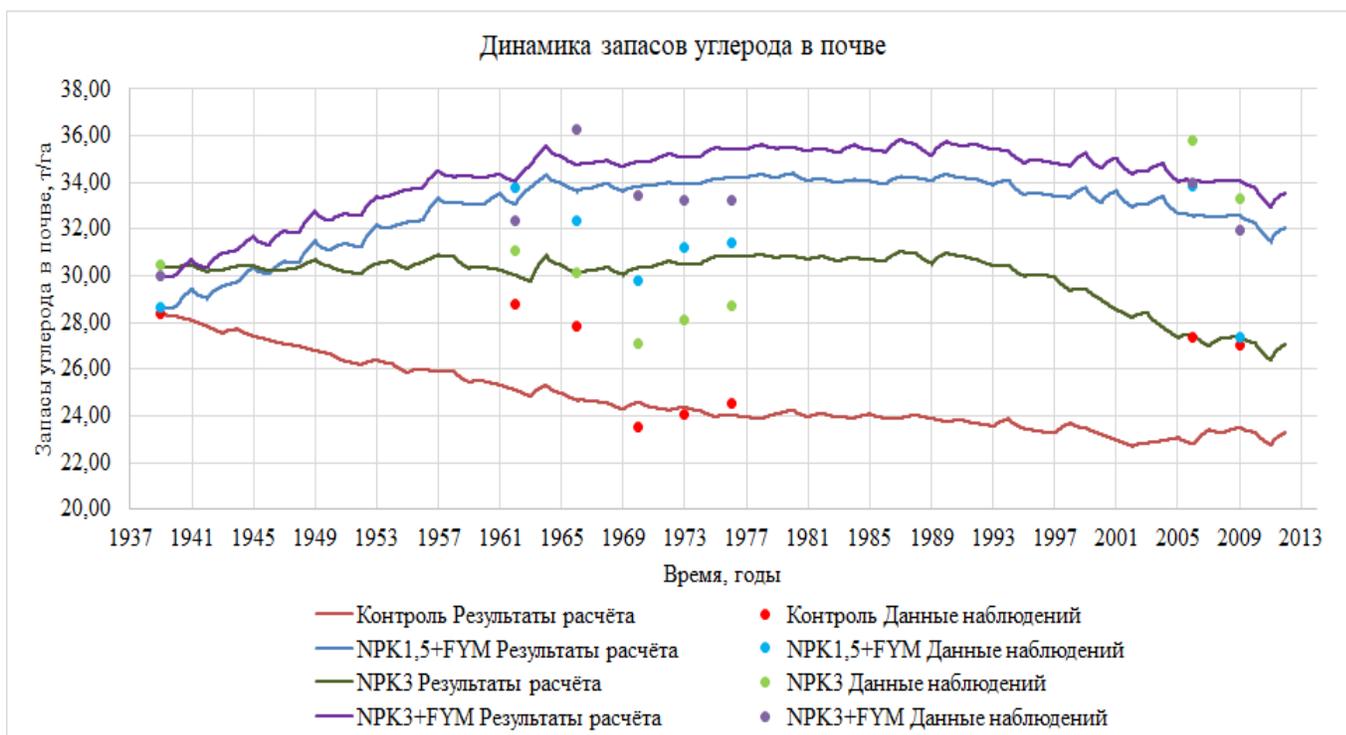


Рис.1. Результаты моделирования пулов углерода по модели SOCS. Долгопрудненская опытная станция (Московская область); варианты отличаются схемой введения удобрений.

Выводы

На данный момент в конструкторе моделей углеродного цикла полностью реализована и проверена только модель SOCS. Модель RothC, модель ИВМ РАН – МГУ, постепенно реализуются. В случае модели RothC, выполняется моделирование на основании приведённых уравнений. А для модели ИВМ РАН – МГУ выполняется калибровка на основе данных приведённых условий среды.

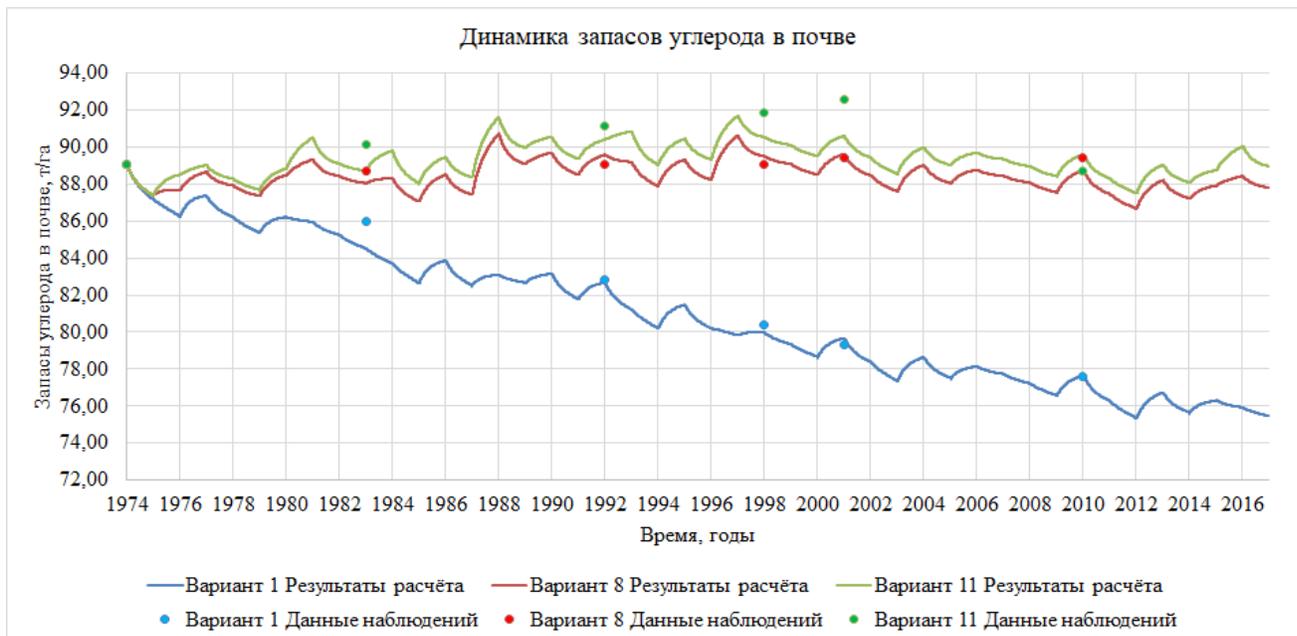


Рис.2. Результаты моделирования пулов углерода по модели SOCS. ФАНЦ г. Ростов; варианты отличаются схемой введения удобрений.

Литература

- Воспроизведение углеродного цикла системы почва-растительность в модели деятельного слоя суши ИВМ РАН – МГУ (TerM) Медведев А.И., Степаненко В.М., Файкин Г.М., Шангареева С.К.
- Общая характеристика перечисленных длительных полевых опытов и природных условий территорий их проведения [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: <http://www.geo-set.ru/ishop/2>.
- Артемьева З.С. (2010) Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. М.: ГЕОС.
- Когут Б.М., Семенов В.М. (2020) Оценка насыщенности почвы органическим углеродом. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева* **102**, 103-124.
- Рыжова И.М. (2022) Анализ динамики органического вещества почв на основе минимальных моделей круговорота углерода. Почвы-стратегический ресурс России: тезисы докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв (Сыктывкар, 2020-2022 гг.) Часть 2, с.130-131.
- Clark D. B. et al.(2011) The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics. *Geosci. Model Dev.* **4**, 701–722.

Володин Е. М. и др. (2016) Математическое моделирование Земной системы. Москва: МАКС Пресс.

Bonan G. B. (1996) Land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and users guide. Technical note. – National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO (United States). *Climate and Global Dynamics Div.*, 1 №. PB-97-131494/XAB; NCAR/TN-417-STR.

ТЕЗИСЫ МОЛОДЕЖНОГО ФОРУМА

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ РАЗНОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ОКРУГА СОЧИ

Аракелова Л.И.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
arakelovali@my.msu.ru

ARAKELOVA LARISA
Soil Science Faculty, MSU, Moscow, Russia

г. Сочи располагается в предгорных прибрежных районах, регулярно подвергающихся процессам водной эрозии, присущей данной местности в условиях гумидного климата. Высокая вероятность оползней существует весной и летом, а также в период паводков и осенних ливневых дождей. Помимо природно-климатических и антропогенных факторов степень эрозионных процессов зависит и от изначальных свойств почвы: гранулометрический состав, минералогический состав, наличие органического вещества, структурное состояние, водопроницаемость, влагоемкость. Исходные свойства и процессы, происходящие в городском округе Сочи, приводят почвы данной территории к изменениям их физико-механических свойств. Изменения вышеупомянутых характеристик почв под действием водной эрозии влияют на микроструктуру и прочность межчастичных связей, которые определяют реологическое поведение почв. Метод реометрии дает детальное представление о деформационном поведении почвы под действием нагрузки.

Целью работы является изучение механических характеристик почв одного генезиса и разного землепользования г. Сочи: желтозем глееватый галечниковый пригородной территории и урбостратозем среднемощный гидроморфизованный среднесуглинистый в черте города. Проведен анализ их взаимосвязи с содержанием органического вещества, гранулометрическим составом и влажностью.

В желтоземе прочностные свойства в большей степени обусловлены содержанием крупных гранулометрических фракций (>0,25 мм), а в урбостратоземе — содержанием органического вещества. Были выстроены ряды почв по значениям реологических параметров. Прочность структурных связей, оцениваемая параметром начального модуля упругости, наибольшая у желтоземов. Широким диапазоном линейного вязкоупругого состояния выделяются горизонты урбостратозема. Урбостратоземы имеют наиболее высокие средние значения точек начала области вязкого течения нежели горизонты желтозема. Также были получены результаты реологического поведения желтоземов при разных влажностях: более высокая влажность уменьшает начальный модуль упругости и увеличивает область

пластичной деформации, сохраняя при этом ту же тенденцию поведения горизонтов, как у образцов менее увлажненных.

УДК 631.466.1

ГРИБЫ В СОСТАВЕ ПЫЛИ, ОТОБРАННОЙ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ, В РЯДЕ ГОРОДОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Валяев Д.А.¹, Иванова А.Е.^{1,2}, Садыков А.Н.¹, Умарова А.Б.¹,

¹ Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

dimamim@list.ru, ivanovaane@gmail.com

² Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва

FUNGI IN THE COMPOSITION OF DUST COLLECTED BY DIFFERENT TECHNIQUES
IN VARIOUS CITIES OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA

Valiaev D.A.¹, Ivanova A.E.^{1,2}, Sadykov S.N.¹, Umarova A.B.¹,

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow

² Institute of ecology and evolution A.N. Severtsov of the Russian Academy of Sciences,
Moscow

Annotation: the study examines the biomass and diversity of fungi present in urban dust samples collected in four different Russian cities. It has been shown that the abundance and species composition of fungi is determined by the climatic zone and the functional purpose of the urban area.

Одним из постоянно присутствующих в городе компонентов окружающей среды является пыль. Формируясь из различных источников, как природных (почва, растения), так и антропогенных (продукты разрушения искусственных материалов), пыль представляет собой сложное гетерогенное органо-минеральное образование, в состав которого входят разнообразные микроорганизмы, в том числе и грибы. Перемещаясь в пространстве на значительные расстояния вместе с потоками воздуха, взвешенные частицы оседают на поверхностях, формируя твердые атмосферные выпадения.

В работе исследовались образцы пыли и почвы, отобранные на территории ряда городов Европейской части России: Сыктывкара, Москвы, Краснодара и Сочи. Отбор твердых атмосферных выпадений производился в двух функциональных зонах (в зоне рекреации и на придорожной территории) двумя методами: путём смётов и с применением пылесоса-компрессора. Образцы почвы отбирались из верхних горизонтов урбанозёмов. Для образцов был проведен анализ количественного и качественного содержания грибов.

По данным прямой люминесцентной микроскопии (грибные компоненты окрашивались красителем калькофлуором белым), была дана оценка грибной биомассы. Показано, что на количество присутствующих в пыли грибных спор и соотношение их размерных фракций имеет влияние как расположение точки отбора проб в городской черте (придорожные территории и парковые зоны), так и общие

природно-климатические условия, характерные для зоны, в которой расположен город. Так, обнаружено, что во всех случаях доля биомассы спор в составе седиментов выше в пыли придорожных территорий, по сравнению с парковыми территориями. Также было показано, что в составе пыли запасы грибной биомассы представлены преимущественно спорами, а не мицелием.

Посредством классических культуральных методов была дана оценка таксономическому разнообразию грибов в составе образцов. Обнаружено, что видовое разнообразие культивируемых микромицетов в составе пыли выше, чем в верхних горизонтах городских почв. Для пыли, отобранной на территориях с высокой техногенной нагрузкой, характерно выявление в доминантах условно-патогенных видов (*Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.*). На парковых территориях выявлено в целом большее разнообразие видов и обнаружены грибы, ассоциированные с живыми растениями или их остатками (*Fusarium spp.*, *Cladosporium spp.*, *Alternaria spp.*). Показано не только заметное отличие микобиоты пыли от почвенной, но также выявлено влияние способа отбора пыли на получаемые результаты обилия выделяемых микромицетов. Это свидетельствует об отборе различных фракций пыли с разным содержанием грибной компоненты при использовании для пробоотбора метода смётов и компрессорного метода. Отмечены различия в составе грибной компоненты в пыли надземного и напочвенного ярусов.

УДК 631.412

ОСОБЕННОСТИ АППРОКСИМАЦИИ ИЗОТЕРМ В СЛУЧАЕ АДСОРБЦИИ МЕДИ ПОЧВАМИ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ

Иовчева А.Д.¹, Пинский Д.Л.¹

¹ИФХиБПП РАН, Пушкино, Российская Федерация
y_nastia@mail.ru; pinsky43@mail.ru

SPECIFIC FEATURES OF ISOTHERMS APPROXIMATION IN CASE OF COPPER
ADSORPTION BY SOILS OF FOREST-STEPPE ZONE

Iovcheva A.D., Pinsky D.L.

The Institute of Physico-Chemical and Biological Problems in Soil Science RAS, Pushino,
Russian Federation

Annotation: The experiment on adsorption of Cu by Chernozem, Solonets and Saline Chernozem soil was carried out. Soil uptake of copper is greater than 90%. Adsorption isotherms have a complicated form, but they are approximated by the Henry and Freundlich equations under specific conditions.

Несмотря на то, что уравнения адсорбции Лэнгмюра и Фрейндлиха наиболее часто применяется в исследовании адсорбционных свойств почв, не всегда оказывается возможным использование их классических вариантов для аппроксимации экспериментальных данных. С целью получить представление об адсорбционной способности почв Барабинской лесостепи и механизмах поглощения Cu их твердой фазой был проведен эксперимент. Образцы – гумусовые горизонты чернозема квазиглееватого (AU), гумусово-квазиглеевой почвы (HAU) и солонца темного квазиглеевого (SEL) заливали серией растворов ацетата Cu с концентрацией от 2 до 200 мг/л (от 0,03 до 3 ммоль/л) в соотношении почва:раствор равном 1:10. Для достижения равновесия системы перемешивали и оставляли на сутки. Содержание Cu в равновесном растворе (отфильтрованном и центрифугированном) определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Модели, использованные для аппроксимации изотерм, считались значимыми при уровнях значимости $\alpha = 0,05$ и $0,1$.

Доля поглощения Cu для всех образцов более 90%. Изотерма чернозема квазиглееватого может быть аппроксимирована с помощью уравнений Лэнгмюра, Фрейндлиха и Генри. Адсорбция Cu солонцом темным квазиглеевым достоверно описывается уравнениями Фрейндлиха и Генри. Однако, первое имеет степень $1/n=2$, что не является характерным значением (обычно $0 < 1/n < 1$). Сложная форма изотермы адсорбции гумусово-квазиглеевой солончаковой почвы не описывается достоверно ни одним из классических уравнений адсорбции. Она была разделена на

2 участка, которые были описаны по отдельности. Более пологий участок изотермы, с диапазоном поглощенных концентраций $C_{u_{ads}}=0-3$ ммоль/кг достоверно аппроксимируется уравнениями Фрейндлиха и Генри, а более крутой участок изотермы от 3 до 30 ммоль/кг – с помощью уравнения Генри. Для уточнения результатов аппроксимации изотерм планируется дополнить сорбционный эксперимент рядом точек, лежащих внутри и вне используемого диапазона концентраций.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУБСТРАТОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ КАК ОСНОВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗЕЛЁНОЙ КРОВЛИ

Корытина М.А.¹, Гончаров В.М.¹, Фаустова Е.В.¹, Чуфаровская О.И.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
miss.korytina@yandex.ru

PHYSICAL PROPERTIES OF SUBSTRATES AND THEIR COMPONENTS AS THE BASIS OF GREEN ROOF FUNCTIONING

Korytina M.A.¹, Goncharov V.M.¹, Faustova E.V., Chufarovskaya O.I.

¹Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: Selecting a suitable substrate based on its water permeability, air permeability, moisture retention, deformation resistance, density and structure is an important step in creating a healthy and sustainable green roof that can effectively perform its functions in an urban environment. Several types of substrates were considered and the influence of such components as peat, agroperlite, coconut fiber, compost on the physical properties of the substrates was assessed.

Введение

Зелёные кровли становятся все более популярным решением для улучшения качества жизни в городе. Это связано с рядом аспектов: «зеленые крыши» оказывают благоприятное влияние на экологическую обстановку: способствуют улучшению качества воздуха; увеличивая альбедо, сильнее отражают тепло в отличие от распространенных кровельных материалов, тем самым ослабляя эффект городского острова тепла.

Данная технология также позволяет сохранять дождевую воду, снимая нагрузку с водостоков. Исследования зеленых крыш (Liesecke, H-G, 1999), показали, что экстенсивная крыша без дренажа и с тонким слоем субстрата задерживает 47% влаги, а кровля со всеми слоями конструкции и с толстым слоем почвы задерживает 74% поступающей влаги. Таким образом, даже более тонкая зеленая крыша будет в 3 раза эффективнее, чем обычная крыша, в борьбе с проблемой ливневых стоков. Кроме того, зеленая крыша является естественным фильтром, поэтому стекающую с крыш воду можно использовать в дальнейшем как для орошения других растений в течение теплого времени года, так и для других целей.

Одним из ключевых аспектов успешного функционирования зелёной крыши является выбор подходящего субстрата с учетом его физических свойств.

Качество, структура, состав и состояние субстрата – это основные условия существования растений и микроорганизмов в саду, их жизненная среда. Наилучшими питательными свойствами обладает естественная почва. Однако ее использование ограничивается значительным весом (плотность может достигать 1,5-1,6 г/см³).

Уменьшить вес этого слоя можно, применяя смеси, которые получили название субстратов. Они могут включать в состав различные органические и неорганические компоненты, а также удобрения, например: песок, пеностекло, керамзит, перлит, кирпичная крошка, кокосовое волокно и древесные щепки.

Помимо веса учитывается также влагопроводность и водоудерживающая способность компонентов субстрата, чтобы обеспечить быстрый сток и предотвращение застоя влаги во время обильных осадков при запасе доступной для растений влаги в диапазоне от наименьшей влагоемкости до влажности завядания.

Кроме водно-физических свойств необходимо учитывать их теплофизические характеристики, обеспечивающие прогрев корнеобитаемого слоя. Состав субстрата должен обеспечивать растения необходимыми питательными элементами, поэтому в эти смеси нередко добавляют питательные вещества и удобрения, улучшающие физические и биохимические свойства грунта, стабилизирующие его структуру.

Предъявляемые требования ставят задачу комплексных исследований физических свойств субстратов, используемых в озеленении крыш, для выявления наиболее оптимальных почвенных конструкций с учетом потребностей растений и климатических особенностей региона.

С этой целью были проведен анализ литературных источников по данной теме, проведен подбор компонентов для формирования субстратов, а также совершен ряд исследований агрофизических свойств субстратов лабораторно. Исходя из полученных данных по агрофизическим свойствам субстратов была проведена оценка водных и тепловых режимов данных субстратов.

Результаты и обсуждение

После анализа литературы и подробного изучения ГОСТ Р 58875-2020 «Озеленяемые и эксплуатируемые крыши зданий и сооружений. Технические и экологические требования» были выявлены компоненты субстрата, которые отвечают заданным требованиям (табл.1).

Таблица 1. Требования к субстратом и подходящие компоненты

Требования	Подходящие компоненты
1. Стабильный состав, инертность	Пеностекло, агроперлит, песок, битый кирпич
2. Соотношение воды и воздуха должны быть благоприятны для жизнедеятельности растений (диаметр частиц 3-6 мм)	Пеностекло, компост, органо-минеральная смесь на основе ОСВ

3. Малая плотность, механическая прочность и долговечность	Агроперлит, пеностекло, керамзит
4. Не подвержен сильной эрозии	Битый кирпич
5. Высокая влагоудерживающая способность, пористость.	Кокосовое волокно, торф, компост, пеностекло, агроперлит, бентонитовая глина
6. Высокая сорбционная способность субстратной смеси и меньшее выщелачивание	Бентонитовая глина
7. Экономическая эффективность	Песок, торф, компост, агроперлит

Таким образом, в качестве компонентов субстратов были отобраны песок, верховой торф, компост, органо-минеральная смесь на основе осадка сточных вод (ОСВ), кокосовое волокно, пеностекло, керамзит, агроперлит. Смеси (почвенные субстраты) различались пропорциями слагающих их компонентов (% по объему).

Выводы

Исследование показало, что почвенные субстраты из данных компонентов будут обладать хорошей водной проницаемостью и аэрируемостью. Изучение водно-воздушного режима показало, что субстраты с большим содержанием органического вещества (торфа, кокосового волокна) способны создать более подходящие условия для роста и развития растений благодаря их большей водоудерживающей способности.

В заключение, физические свойства субстратов и их компонентов играют ключевую роль в обеспечении эффективного функционирования зелёной кровли. Выбор подходящего субстрата с учетом его водопроницаемости, воздухопроницаемости, удержания влаги, устойчивости к деформации, плотности и структуры является важным шагом для создания здоровой и устойчивой зелёной кровли, способной эффективно выполнять свои функции в городской среде.

Литература

- Liesecke, H-J. 1999. Extensive Begrünung bei 50 Dachneigung. Stadt Und Grun, **48 (5)**, 337-346. (In German)7.
- Mentens J., Raes D., Hermy M. (2006) Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and urban planning*. **77(3)**, 217-226.
- Mobilia M., Longobardi A. (2017) Smart stormwater management in urban areas by roofs greening. *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2017: 17th International*

- Conference, Trieste, Italy, July 3-6, 2017, Proceedings, Part III 17. – Springer International Publishing, 455-463.
- Osmundson, T. 1999. Roof Gardens: History, Design, and Construction. New York, New York: W.W. Norton & Company Ltd.
- ГОСТ Р 58875-2020 «Озеленяемые и эксплуатируемые крыши зданий и сооружений. Технические и экологические требования». 2020 г.
- Корытина М.А. Гончаров В.М., Фаустова Е.В. (2023) Физические свойства субстратов для кровельного озеленения. *Проблемы Агрохимии и экологии*, **3**, DOI:10.26178/AE.2023.16.64.010
- Неганова Е. Н. 2011. Озеленение кровель как фактор повышения устойчивости городской среды. *Инновации в ландшафтной архитектуре*. [Текст]: Материалы VII научно-практической конференции./Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т-Н. Новгород: ННГАСУ, 2011.-131 с. 116.
- Шейн Е. В. 2005. Курс физики почв.
- Шейн Е. В. и др. 2007. Теории и методы физики почв.

УДК 631.51

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ПОСЕВА НА СТРОЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО

Фарходов Ю.Р., Данилин И.В., Ермолаев Н.Р., Надуткин И.А., Холодов В.А.
ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», г. Москва, yulian.farkhodov@yandex.ru

Применение практик устойчивого сельского хозяйства является важным условием производства экологически чистых продуктов питания. Одним из основных составляющих устойчивого сельского хозяйства является биологизация земледелия, которая направлена на повышение ресурсного потенциала почв и эффективности его использования. В настоящее время наиболее активно развивающейся агротехнологией в целях биологизации земледелия является прямой посев (ПП). Эта технология предполагает отказ от традиционной обработки почвы, следовательно, требует меньше трудозатрат и применения техники. Известно, что использование технологии ПП положительно влияет на факторы плодородия почвы: повышает водоустойчивость структуры почвы, увеличивает долю агрономически ценных агрегатов, приводит к накоплению влаги в почве, увеличивает микробную биомассу и ее активность. Показано, что длительное применение технологии ПП приводит к накоплению почвенного органического вещества (ПОВ), при этом малоизвестно о влиянии ПП на трансформацию состава ПОВ.

Целью данного исследования было оценка влияния технологии ПП на состав ОВ черноземов. Объектом исследования были черноземы обыкновенные многолетних полевых опытов (г. Зерноград, Ростовская обл.) по изучению способов обработки почвы: традиционная обработка (ТО) и ПП. Молекулярный состав ОВ определяли методом пиролитической газовой хроматографией с масс-спектрометрией. В результате исследования идентифицировано 30 пиролизатов, отражающих строение ПОВ. Показано высокое относительное содержание алкилбензолов, алкилнафталинов, среднецепочечных алканов среди пиролизатов ПОВ варианта ТО в сравнении с ПП. Среди пиролизатов ПОВ варианта ПП наблюдается высокая доля фурфурола, пиридинов, пирролов и фенолов. Содержание длинноцепочечных алканов не различалось по вариантам опытов. Пиролитический профиль изученных черноземов указывает на высокое содержание ПОВ, прошедшее процесс биохимической трансформации. Состав пиролизатов ПОВ варианта ТО указывает на обилие компонентов инертного пула ПОВ не участвующих в процессах микробной трансформации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 24–26–00293.

УДК 631.412

ВЛИЯНИЕ БИОЧАРА НА ТРАНСФОРМАЦИЮ УГЛЕВОДОРОДОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ В МИКРОМОДЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Фортова С.М.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
fortova.sofia@yandex.ru

FORTOVA SOFIA
Soil Science Faculty, MSU, Moscow, Russia

Биочар — твердый высокопористый материал с высоким содержанием углерода, полученный в результате пиролиза биомассы. Биочар обладает большой удельной поверхностью и может сорбировать различные соединения на своей поверхности. рядом исследований показано, что внесение биочара может ускорять процесс биоремедиации почв, загрязнённых нефтепродуктами, так как внесение сорбентов положительно влияет на рост микроорганизмов-деструкторов.

Целью работы является изучение влияния биочара на трансформацию углеводородов нефти в почве аборигенными микроорганизмами в ходе микромоделного эксперимента.

При проведении микромоделного эксперимента использовались микрокосмы с почвой (по 5 г почвы в каждом), в которые было добавлено по 10% (относительно массы почвы) дизельного топлива. Исследовались образцы из верхних горизонтов трех разных почв: подзола, агродерново-подзолистой и агросерой почвы. Перед инкубацией в образцы был добавлен биочар (по 5 % относительно общей массы). В контрольные образцы биочар не добавлялся. Микрокосмы инкубировались в течение двух месяцев при постоянной температуре и влажности, а также проветривались. Образцы для аналитических исследований были взяты до инкубации, после 1 месяца инкубации и по истечении срока инкубации.

Дальнейшие анализы проводились химическими методами. Была проведена экстракция доступной фракции и исчерпывающая экстракция. Для качественного и количественного определения соединений использовался метод газовой хромато-масс-спектрометрии.

В результате эксперимента после двух месяцев инкубации снизилось количество ароматических соединений. В агросерой почве с биочаром наблюдалось снижение суммарного содержания бифенилов на 40,5 %. При этом содержание доступной фракции бифенилов снизилось в 7 раз. Также в почве с биочаром снизилось количество соединений нафталиновой фракции (метил- и

диметилнафталинов) на 55,7%, при этом в почве без внесения биочара содержание снизилось на 10,2 %.

В почве с биочаром шло более активное разложение углеводов нефтепродуктов, имеющих ароматическую структуру. Снижение содержания доступной фракции показывает, что минерализация может протекать непосредственно на поверхности биочара.



**ЛАБ
Инструменты**



www.labinstruments.ru
sa@labinstruments.ru
+7(499)213-2652 (доб. 901)
+7(903)762-0296

Компания ЛАБИНСТРУМЕНТЫ работает с 2006-го года и прочно занимает лидирующие позиции на рынке лабораторного оборудования

Компания ЛАБИНСТРУМЕНТЫ занимается поставками высококачественного лабораторного оборудования, аналитических приборов, расходных материалов и реагентов из США и Европы, а теперь также и из Китая.

Компания ЛАБИНСТРУМЕНТЫ специализируется на поставках в РФ и страны СНГ оборудования для изучения окружающей среды (почва, атмосфера, вода, освещенность), а также для изучения и выращивания растений.

Компания ЛАБИНСТРУМЕНТЫ поставляет оборудование для мониторинга параметров окружающей среды, а также для ботаники, физиологии и морфологии растений, для фотосинтеза и респирации, для селекции, для культивирования растений, для теплиц и агротехники и для многих других целей!

Компания ЛАБИНСТРУМЕНТЫ эксклюзивно представляет в России большинство ведущих производителей оборудования из США и Европы.

Компания ЛАБИНСТРУМЕНТЫ имеет прямые связи с производителями, что даёт возможность обеспечить официальную техническую поддержку от производителей и самые лучшие цены.

Компания ЛАБИНСТРУМЕНТЫ обеспечивает высококвалифицированную поддержку благодаря наличию в нашем штате специалистов, обученных у производителей зарубежом.

Компания ЛАБИНСТРУМЕНТЫ гарантирует индивидуальный подход к каждому клиенту и полный комплекс услуг по поставкам и последующему сопровождению оборудования.



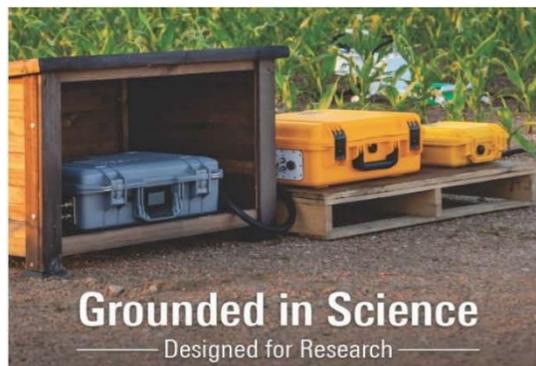


www.labinstruments.ru
sa@labinstruments.ru
+7(499)213-2652 (доб. 901)
+7(903)762-0296

Цель Компании ЛАБИНСТРУМЕНТЫ — предложить Вам максимально разнообразный ассортимент высококачественной продукции и профессиональный сервис. Накопленный нами опыт сделают Ваше сотрудничество с нами максимально продуктивным и комфортным для Вас!

В ассортименте компании ЛАБИНСТРУМЕНТЫ:

- ✓ Оборудование для оснащения карбоновых полигонов
- ✓ Системы анализа газообмена почв
- ✓ Газоанализаторы парниковых газов
- ✓ Анализаторы параметров почвы
- ✓ Датчики влажности, температуры, проводимости почвы.
- ✓ Станции анализа атмосферы методом eddy covariance
- ✓ Анализаторы параметров растений
- ✓ И многое другое!



Оборудование для анализа почв от Компании ЛАБИНСТРУМЕНТЫ

- ✓ **Газоанализаторы парниковых газов:** портативные и стационарные, на один парниковый газ или на несколько парниковых газов сразу.
- ✓ **Системы измерения газообмена почв:** портативные и стационарные, однокамерные или многокамерные. Подключение десятков рабочих камер и нескольких газоанализаторов!
- ✓ **Почвенные камеры:** портативные и стационарные автоматические камеры, непрозрачные и прозрачные камеры для измерений NCE.
- ✓ **Датчики параметров почвы:** температура, влажность, засоленность, проводимость, диэлектрическая проницаемость. Датчики типа «всё в одном», профилирование.
- ✓ **Комплекты для мониторинга почвы:** датчики параметров почвы + даталоггеры (регистраторы сигнала с датчиков). Память, дисплей, автономное электропитание + управление со смартфона!



Наши производители оборудования для анализа почв:

LI-COR (США), PP SYSTEMS (США), STEVENS WATER (США), DYNAMAX (США), AROGEE (США), DELTA-T (Англия), HUKSEFLUX (Голландия), QUBIT SYSTEMS (Канада), LICA (Китай), PRI-ECO (Китай), HEALTHY PHOTON (Китай)



ООО «ZION RUS»

Компания «ЦИОН РУС» основана в 2017 году и специализируется на производстве и продаже ионитных субстратов ТМ ЦИОН для выращивания растений.

Ключевой миссией Компании является улучшение качества жизни за счет восстановления лесного покрова планеты, благоустройства городских ландшафтов и обеспечения человека здоровыми и полезными продуктами питания растительного происхождения.

Основные цели Компании: повышение эффективности любительского и профессионального растениеводства при снижении временных и трудовых затрат на получение урожая и отсутствии негативного влияния на экологию, а также решение проблемы восстановления плодородия истощенных и деградированных почв во всем мире.

Ионитный питательный субстрат ЦИОН (ZION) разработан совместно с Институтом физико-органической химии Национальной академии наук Республики Беларусь для выращивания растений на любом грунте по технологии ионитопоники*. ЦИОН содержит в своем составе все питательные вещества, необходимые для качественного и гармоничного роста растений. Субстрат обладает пролонгированным действием и является 100% экологичной добавкой к грунту благодаря тому, что производится на основе природных минералов. Высокое содержание элементов питания и уникальный принцип действия ионитных субстратов ЦИОН обеспечивают интенсивный рост растений, развитие сильной корневой системы, повышают урожайность зеленных, овощных и плодово-ягодных культур, сокращают сроки созревания урожая, способствуют раннему и длительному цветению садовых и комнатных цветов, а также легкой адаптации саженцев при посадке и пересадке. ЦИОН может использоваться как самостоятельно, так и в виде малых корректирующих добавок к любым основам (обедненные и деградированные грунты, пески, перлит, вермикулит, разбалансированная почва любого состава и др.).



**Созданные ранее в рамках советской космической программы ионитные субстраты на полимерной основе активно используются для выращивания растений на космических челноках, арктических станциях и в других экстремальных условиях. В настоящее время технология ионитопоники и ионитные субстраты адаптированы для нужд современного сельского хозяйства.*

ООО «Уралхим Инновация»

«Уралхим Инновация» — современный центр исследований и разработок, ориентированный на развитие инновационной деятельности Группы «Уралхим».

Ключевые задачи R&D-центра:

- Технологический скаутинг инновационных идей и проектов с целью их интеграции в R&D-цикл центра и последующего внедрения в производственные процессы Группы
- Разработка продуктовых решений и технологий в сфере сельского хозяйства и промышленной химии
- Организация работы с научно-образовательными, исследовательскими учреждениями и стартапами

Инфраструктура «Уралхим Инновация» представлена высокотехнологичными лабораториями, оснащенными современным исследовательским оборудованием (химико-аналитическим, микробиологическим), комнатой для вегетационных опытов и центром масштабирования лабораторных технологий, что позволяет решать широкий спектр проектных задач от этапа формирования идей до пилотных испытаний продуктов.

УРАЛХИМ
ИННОВАЦИЯ