



*Ямало-Ненецкий автономный округ*

*Рабочая группа по мерзлотным почвам Международного союза наук о почвах*

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН*

*Санкт-Петербургский государственный университет*

*Институт географии РАН*

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева*

*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*

*Всероссийское общество почвоведов им. В.В. Докучаева*

*Научный центр изучения Арктики*

*Российский центр освоения Арктики*

**Всероссийская научно-практическая конференция**

**МЕРЗЛОТНЫЕ ПОЧВЫ**

**В АНТРОПОЦЕНЕ**

20-26 августа, 2023

Салехард–Лабытнанги, ЯНАО, Россия

**СБОРНИК ТЕЗИСОВ**

УДК 631.445:551.34  
ББК П034.12+Д48  
М52

*Проведение конференции и подготовка сборника тезисов осуществлены при финансовой поддержке Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа*

**Ответственные редакторы**

кандидат биологических наук **А.В. Лупачев**

кандидат биологических наук **Е.М. Лаптева**

**М-52 Мерзлотные почвы в антропоцене** [Электронное издание]: сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции (Салехард – Лабытнанги, ЯНАО, Россия, 20-26 августа 2023) / отв. ред.: А.В. Лупачев, Е.М. Лаптева. – Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2023. – 289 с.

В сборнике представлены тезисы докладов, прозвучавших на заседаниях и круглых столах, в рамках работы Всероссийской научно-практической конференции «Мерзлотные почвы в антропоцене», где рассматривались специфика и особенности формирования почв в криолитозоне России и мира в целом, обсуждались вопросы влияния и оценки глобального и локального антропогенного воздействия на мерзлотные почвы Российской Арктики, экологические проблемы освоения природных ресурсов и восстановления природной среды Крайнего Севера, в том числе Ямальского региона.

При издании сборника проведено техническое редактирование поступивших для публикации тезисов. Сущность научных текстов не изменена. Ответственность за научное содержание несут авторы.

ISBN: 978-5-6050144-1-6 [Электронное издание]

DOI: 10.5281/zenodo.8199526

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

### **ПРЕДСЕДАТЕЛИ:**

Мажаров Александр Викторович,  
*заместитель Губернатора Ямало-Ненецкого автономного округа, директор департамента  
внешних связей Ямало-Ненецкого автономного округа, Салехард*

Исаев Владислав Сергеевич  
*Научный центр изучения Арктики, Салехард*

Абакумов Евгений Васильевич  
*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

Лаптева Елена Морисовна  
*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар*

Лупачев Алексей Владимирович  
*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино*

### **ЧЛЕНЫ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:**

Лупачев Алексей Владимирович  
*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино*

Абакумов Евгений Васильевич  
*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

Бобрик Анна Александровна  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

Бунина Оксана Александровна  
*ООО «Газпром проектирование», Санкт-Петербург*

Ван Вэньцзюань  
*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

Васильева Галина Кирилловна  
*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино*

Герасимова Мария Иннокентиевна  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

Горячкин Сергей Викторович  
*Институт географии РАН, Москва*

Гинзбург Александр Павлович  
*Научный центр изучения Арктики, Салехард*

Гололобова Анна Григорьевна

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск*

Губин Станислав Викторович

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино*

Дворников Юрий Александрович

*Российский университет дружбы народов, Москва*

Долгих Андрей Владимирович

*Институт географии РАН, Москва*

Евграфова Светлана Юрьевна

*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

Исаев Владислав Сергеевич

*Научный центр изучения Арктики, Салехард*

Конюшков Дмитрий Евгеньевич

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАН, Москва*

Лаптева Елена Морисовна

*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар*

Лесовая Софья Николаевна

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

Матышак Георгий Валерьевич

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

Моргун Евгения Николаевна

*Научный центр изучения Арктики, Салехард*

Никитин Дмитрий Алексеевич

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАН, Москва*

Ходжаева Анна Каримовна

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино*

Шамрикова Елена Вячеславовна

*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Якутск*

Шатилович Анастасия Валерьевна

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино*

Шеин Александр Николаевич

*Научный центр изучения Арктики, Салехард*

Vladimir Sheinkman

*Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel*

**ЧЛЕНЫ ОРГАНИЗАЦИОННОГО КОМИТЕТА:**

Лупачев Алексей Владимирович

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино*

Абакумов Евгений Васильевич

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

Долгих Андрей Владимирович

*Институт географии РАН, Москва*

Конюшков Дмитрий Евгеньевич

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАН, Москва*

Матышак Георгий Валерьевич

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

Атамас Мария Ивановна

*Департамент внешних связей ЯНАО, Салехард*

Абтрахимова Лия Рашидовна

*Департамент внешних связей ЯНАО, Салехард*

Королева Екатерина Сергеевна

*Научный центр изучения Арктики, Салехард*

**СЕКРЕТАРИАТ:**

Лупачев Алексей Владимирович

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино*

Абтрахимова Лия Рашидовна

*Департамент внешних связей ЯНАО, Салехард*

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

## История и перспективы изучения почвенного покрова ЯНАО

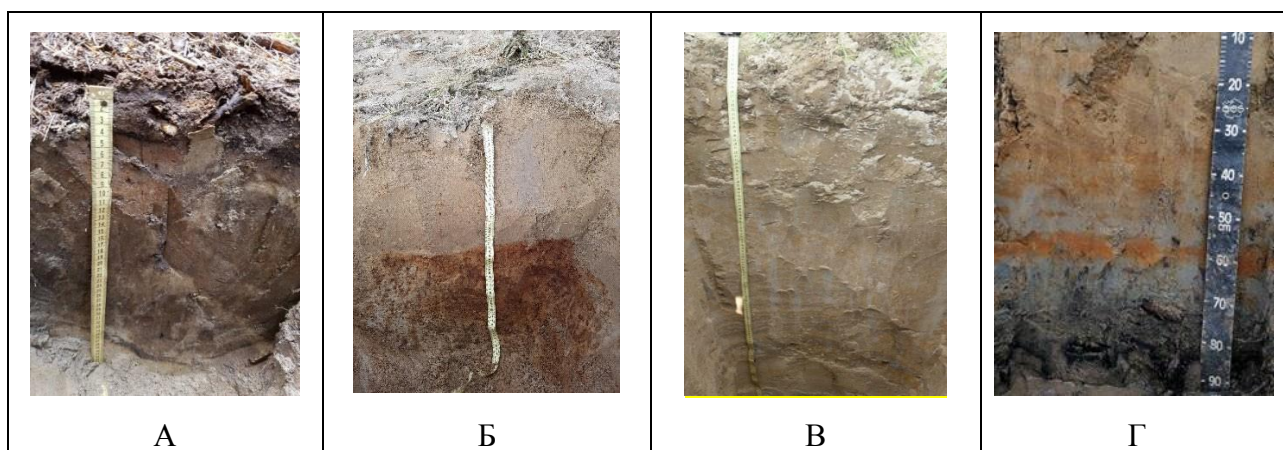
*Моргун Е.Н.<sup>1</sup>, Абакумов Е.В.<sup>2</sup>, Печкин А.С.<sup>1</sup>, Низамутдинов Т.И.<sup>2</sup>, Ильясов Р.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Научный центр изучения Арктики, Салехард-Надым, Россия*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

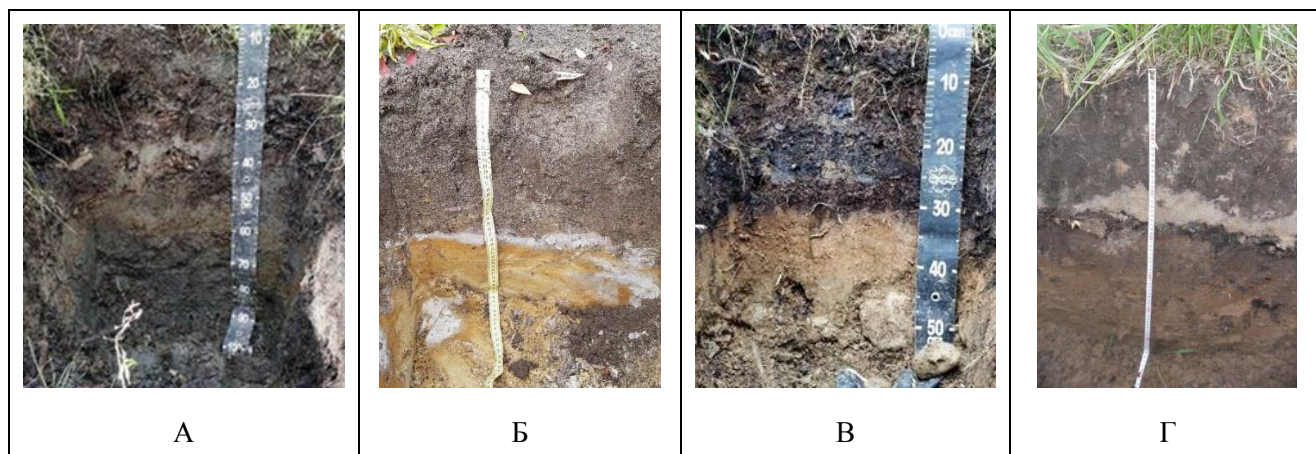
*e-mail: morgun148@gmail.com*

В течение XX века в Ямало-Ненецком автономном округе работали сотни почвоведов и десятки научных коллективов, перечислить, которые не позволяет формат статьи. В качестве ключевых следует отметить работы, посвященные комплексному изучению почвенного покрова [Васильевская и др., 1988] и работы по районированию почвенного покрова [Михайлов, Михайлов, 2017]. Первой же работой, вероятно, является труд Б.Н. Городкова [Городков, 1932]. В настоящее время по сравнению с северными частями Восточной Сибири территория ЯНАО относительно изучена в почвенном отношении. Тем не менее исследования почв здесь сильно ограничены, что связано с особенностями транспортных и логистических возможностей на отдельных территориях. Наиболее изучены почвы вокруг Салехардской агломерации, Бованенковского месторождения и поселка Сабетта. Имеются подробные сведения о природных альфегумусовых и тундровых глеевых почвах Надым-Пуровской геохимической провинции. Гораздо меньше внимания уделялось изучению почв ООПТ: так, экспедицией морского базирования ЯМАЛ-Арктика-2013 на территории Гыданского заповедника была предпринята первая в истории региона музеефикация почв региона и отобраны монолиты, хранящиеся в Центральном музее почвоведения им. В.В. Докучаева. Сейчас изучен феномен мигрирующих песков и формирования техногенных дюн; организованы круглогодичные термометрические исследования почв (один из примеров – стационар «Еркута»); проведены экотоксикологические исследования почв природных тундр и урбанизированных экосистем; впервые подробно изучены процессы пирогенной трансформации почвенного покрова тундр как фактора деградации оленьих пастбищ. В 2015-2022 гг. были проведены детальные исследования заполярных агроценозов (почвы полей, огородов, теплиц и залежи), включая изучение микробиома (рис.1-2).



**Рис. 1.** Строение почвенных профилей агроценозов: полей

- (А – агродерново-подбур иллювиально-железистый (поле д. Ямгорт, Шурышкарский р-н),  
 Б – агрозем иллювиально-железистый оруденелый (поле с. Красноселькуп, Красноселькупский район),  
 В – агродерново-подбур на поле Ямальской опытной сельскохозяйственной станции (г. Салехард),  
 Г – серогумусовая супесчаная глеевая на погребенных торфяниках (частный питомник Виктора Бурко, г. Салехард)



**Рис. 2.** Строение почвенных профилей агроценозов огородов и залежей:

А – глеезем агросерогумусовый постагрогенный урбистратифицированный (25-летняя залежь пос. Товогогол, Приуральский р-н),

Б – агроподзол иллювиально-железистый перегнойный, глееватый, криогенно-турбированный (огород с. Толька, Красноселькупский р-н),

В – урбоагрозем по подбуру (залежь огорода пос. Полярный, Приуральский р-н),

Г – дерново-подбур постагрогенный иллювиально-железистый (4-летняя залежь с. Мужы Шурышкарский р-н).

При этом в условиях глобального изменения природной среды и климата, максимально выраженных именно в высоких широтах, необходимо продолжить исследования почвенного разнообразия на территории ЯНАО, а именно:

1. для сохранения очагов уникального почвенного разнообразия региона (с соответствующей паспортизацией мест охраны) и формирования Красной книг почв ЯНАО в перспективе необходимо создание реестра почв по следующим категориям: (1) эталоны – фоновые ненарушенные почвы (во всех природных зонах), (2) почвы – объекты мониторинга (химического, агрономического, геокриологического), (3) редкие почвы (экзоты, интразональные почвы, реликты прежних геологических эпох), (4) исчезающие почвы (в результате антропогенной активности или природных процессов, например, термоабразии берегов), (5) недостаточно изученные почвы.
2. продолжение мониторинга почв и почвенного покрова поля Ямальской опытной станции – уникального «Вавиловского» поля (как наследие советского мегапроекта «Полярное земледелие») – площадки агрохимического и агроэкологического мониторинга, расположенной на полярном круге и существующей почти 100 лет.
3. организация комплексного площадного агрохимического и термометрического мониторинга агропочв действующих хозяйств и залежей в контексте имплементации программы реосвоения залежных почв «Вторая целина...». При этом предлагаемые работы позволят оценить потенциал «скрытой продовольственной корзины» севера Западной Сибири в условиях изменяющегося климата.
4. продолжение изучения практик частного огородничества коренных малочисленных народов Севера в различных климатических и ландшафтных условиях ЯНАО, которые отвечают земледельческим практикам в районах Южной Гренландии, финской Лапландии, а также практикам в отдаленных рыбацких поселениях Аляски.
5. организация и продолжение исследований почв археологических памятников и священных мест коренных малочисленных народов Севера с целью последующей охраны.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Авторы выражают благодарность Правительству ЯНАО за всестороннюю поддержку. Работы были выполнены при поддержке НЦМУ «Агротехнологии будущего» и грантов РФФИ-ЯНАО №№ 19-416-89002, 18-44-890003.



*Городков Б. Н.* Почвы Гыданской тундры // Тр. Полярной комиссии АН СССР. Вып. 7. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1932. – С. 1–78.

*Васильевская В.Д., Иванов В.В., Богатырев Л.Г.* Почвы севера Западной Сибири. М.: МГУ. 1988. 227 с.

*Михайлов И.С., Михайлов С.И.* Опыт создания и содержание почвенно-экологической карты Ямало-Ненецкого автономного округа // Бюлл. Почв. Ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 87. С. 55.

## Разнообразие строения и экологические функции почв побережий арктических морей

*Губин С.В., Луначев А.В.*

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН. Пущино,  
Московская обл., Россия  
e-mail: gubin.stas@mail.ru*

Почвы побережий арктических морей России, протяженность которых составляет более 20 тыс. км, имеют важнейшее экологическое значение, но при этом они крайне слабо изучены. В настоящее время в связи с резкой активизацией хозяйственной деятельности в арктических районах, эксплуатации Северного морского пути знания об свойствах побережий, режимах, взаимодействии с местной биотой становятся крайне актуальными. Протяженность береговой линии, разнообразие строения берегов, слагающих их отложений, ландшафтов, мерзлотной обстановки, характер морских условий – соленость вод, приливных и сгонно-нагонных явлений, ледовые режимы – и целый ряд других факторов определяют формирование широкого спектра почв, строение и свойства которых определяются здесь суровостью климата, криогенными процессами, составом биоты. Значительная часть побережий северных морей представлена берегами аккумулятивного типа со слабыми уклонами поверхностей, что способствует проникновению морских нагонных вод вглубь суши на десятки километров, подпитке ими многочисленных мелких озер, затопляемых заболоченных тундровых территорий с развитым мерзлотным полигональным рельефом. Все это оказывает влияние на специфику строения и свойств формирующихся здесь почв.

В современной Классификации и диагностике почв России [КиДПР] почвы морских побережий полностью отсутствуют. Ранее было предложено все формирующиеся под прямым или опосредованным влиянием моря почвы объединять в неклассификационную группу талассосолей (Шляхов, Костенков, 2020) и включать в нее слаборазвитые незадернованные почвы ваттов, почвы маршей разной степени засоления под различными растительными ассоциациями, а также маритимные почвы, в которых влияние моря проявляется в аэральном привносе солей и органико-минерального материала с оголенных прибрежных участков (рис. 1).



**Рис. 1.** Распределение почв на морских берегах аккумулятивного типа.

Мерзлотные почвы побережий рассмотрены на примере почв аккумулятивных берегов Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых. Суровый климат, близкое залегание к поверхности границы многолетней мерзлоты (0,4-1 м) вносят существенные коррективы в формирование и развитие талассосолей. Это ведет к сильному переувлажнению маршевых почв, устойчивому восстановительному режиму в их профилях, а при наличии морского засоления – к активной сульфатредукции. Режимы промерзания проявляются в перераспределении солей в толще деятельного слоя, тенденции накопления солей в нижних частях маршевых слаборазвитых почв, где материал может находиться в оттаявшем

состоянии при отрицательных температурах. В этих почвах при слабой задернованности поверхности или ее отсутствии идут активные криотурбационные процессы.

В маршевых почвах на признаки синлитогенного почвообразования накладываются признаки эпигенного педогенеза, которые со временем начинают доминировать и в значительной степени определять строение и свойства профилей, их классификационную принадлежность. Со снижением засоления в этих почвах происходит постепенная смена процессов сульфатредукции на оглеение. При нарастании мощностей торфяных горизонтов снижается активность и изменяются формы проявления криотурбаций. В зонах маршей значительную роль в процессах почвообразования принимает мерзлотный микрорельеф, выраженность, размеры и формы мерзлотных полигонов, задерживающих и накапливающих в своих центральных частях значительные объемы поступающих нагонных морских вод различной степени минерализации.

Маритимные почвы обладают строением и основными свойствами, характерными для распространенных здесь зональных почв тундр. Влияние моря в них проявляется в присутствии в горизонтах отдельных признаков и свойств, не формирующих самостоятельных генетических горизонтов, и связано с импัลверизацией солей, привнесом с оголенных участков маршевых почв минерального материала и растительного детрита, а также с повышенной влажностью материала самых верхних частей профилей из-за близости моря.

На основании изучения почв побережий восточного сектора Арктики, формирующихся в условиях близкого залегания многолетней мерзлоты, были сделаны предложения о внесении почв талассосолей в будущую редакцию классификации почв России. Сохраняя основные подходы и принципы, заложенные в КиДПР, в *стволе синлитогенного почвообразования предлагается введение нового отдела маршевых почв. В стволе первичного почвообразования предлагается создать отдел слабообразованных маршевых почв. В отделе органогенного почвообразования маршевые почвы выделяются на уровне типа в новом предлагаемом отделе аллохтонных органогенных почв* [Губин, Лупачев, 2022]. Предложены подходы к разделению маршевых почв на более низких (типовых и подтиповых) таксономических уровнях.

*Губин С.В., Лупачев А.В.* Подходы к классификации почв аккумулятивных берегов морей восточного сектора российской Арктики. Почвоведение, 2022, № 1, с. 25–32 DOI: 10.31857/S0032180X22010051.

*Шляхов С.А., Костенков Н.М.* Почвы тихоокеанского побережья России, их классификация, оценка и использование. Владивосток. Дальнаука. 2020. С. 177.

## Проблемы рекультивации в зоне мерзлотных почв

*Андроханов В.А.*

*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия*

*e-mail: androhanov@issa-siberia.ru*

В настоящее время (согласно основам государственной политики Российской Федерации) в Арктике на период до 2035 года определена общая концепция освоения арктической зоны России (АЗРФ, утверждена указом Президента РФ от 05.03.2020 № 164), которая ставит, в том числе, и задачи по сохранению окружающей среды на данной территории. Необходимо отметить, что АЗРФ занимает практически четверть всей сухопутной части России и преимущественно расположена в арктическом и субарктическом климатических поясах от западной до восточной границы РФ. В связи со значительной протяжённостью АЗРФ характеризуется весьма разнообразными ландшафтными и природно-климатическими условиями, что отражается на характеристиках растительного и почвенного покрова. Однако основной чертой, которая объединяет все разнообразие территорий, входящих в АЗРФ, и отделяет их от других континентальных областей, является наличие мощных слоев многолетнемерзлых пород. Еще в начале освоения арктических территорий было выявлено, что северные экосистемы малоустойчивы к антропогенному воздействию и длительное время не восстанавливаются после нарушения. Однако на начальном этапе в результате достаточно ограниченного локального антропогенного воздействия рекультивационные работы практически не проводились, поэтому нарушенные участки постепенно восстанавливались естественным образом. Интенсивность естественного восстановления во многом определялась уровнем нарушения компонентов экосистем и видом ландшафтов.

Уровень воздействия определяется двумя основными параметрами: степенью нарушения растительного и почвенного покрова и площадью нарушений. Устойчивость почв и экосистем в данных условиях во многом определяет наличие органогенного слоя, который выполняет множество функций, начиная от терморегулирования поверхности и формирования водного и питательного режимов мерзлотных почв и заканчивая формированием общих условий местообитаний организмов и обеспечения устойчивости основания почв, т.е. мерзлоты. Поэтому нарушение органогенного слоя приводит к деградации мерзлоты, тотальному разрушению всего почвенного комплекса и трансформации естественных экосистем, что и является одной из основных проблем восстановления нарушенных земель в АЗРФ.

Многие исследователи выделяют различные уровни воздействия и последствия нарушений на практике. Наибольший уровень связан с механическим влиянием, когда полностью нарушаются органогенный и минеральные горизонты почв, т.е. формируются новые техногенно нарушенные участки без растительности и почвы. Средний уровень нарушения в большинстве случаев характеризуется частичным нарушением или перемешиванием органических и минеральных горизонтов. В этом случае иногда могут улучшиться некоторые свойства поверхностных горизонтов, но может ухудшиться общее экологическое состояние естественных экосистем. При слабом уровне нарушений частично нарушена целостность органогенного горизонта и незначительно – растительный покров. Такие изменения фиксируются, но они незначительно влияют на общее экологическое состояние территории. Объем рекультивационных работ практически всегда отстает от количества нарушений. Это особенно заметно при интенсивном освоении новых месторождений, что приводит к значительному увеличению нарушенных площадей.

Именно поэтому необходимо искать пути ускоренного восстановления таких территорий и развивать работы по отработке технологий рекультивации нарушенных и

загрязненных земель.

Сегодня сохраняются различные точки зрения на проблему рекультивации нарушенных почв в АЗРФ. С одной стороны, существует мнение, что в суровых условиях проведение рекультивационных работ сильно затруднено и иногда приводит к дополнительным нарушениям, поэтому рекультивацию можно не проводить. С другой стороны, обосновывается необходимость полной, комплексной рекультивации, включающей технический и биологический этапы. На наш взгляд, оба эти подхода имеют право на существование, только с небольшой поправкой, что каждый техногенно нарушенный участок индивидуален и к восстановлению нарушенных земель необходимо подходить с учетом всего комплекса природно-техногенных условий, которые и определяют технологию и необходимый и достаточный уровень восстановления.

Достаточно условно все технологии рекультивации можно разбить на три группы: 1 – когда полностью проводится рекультивация с выполнением технического этапа и формированием искусственных почв с благоприятным корнеобитаемым слоем; 2 – это частичная рекультивация с проведением только биологического этапа, т.е. озеленением и формированием устойчивого растительного покрова и/или внесение удобрений или других материалов улучшающих свойства корнеобитаемого слоя; 3 – когда ничего не делается, и нарушенный участок восстанавливается естественным образом.

Такое разделение подходов к рекультивации позволяет в некоторых случаях упростить выбор направления и ход выполнения рекультивации. В любом случае, согласно всем нормативным документам, перед проектированием рекультивационных работ необходимо обследование нарушенного участка, определение уровня нарушения, лимитирующих факторов и наличие ресурсов рекультивации. В самом общем виде можно считать, что при слабом нарушении, когда нет негативного воздействия нарушения на прилегающую территорию, можно обходиться без рекультивации, так как ускорить восстановление будет проблематично, а получить дополнительные нарушения вполне вероятно. При сильном уровне нарушения без полного комплекса рекультивационных работ восстановление будет идти медленно, и негативное воздействие будет продолжаться длительный период времени. При среднем уровне в зависимости от конкретных условий выполняется частичная рекультивация с формированием растительного покрова и улучшением условий для восстановления биоценозов.

В заключение хотелось бы сказать о ресурсах рекультивации, которые могут использоваться в АЗРФ. Главной целью рекультивации является сокращение негативных последствий от разрушения почв, предотвращение расползания локальных нарушений на большие территории. В условиях АЗРФ есть большой дефицит в субстратах, почвоулучшителях, пригодных для рекультивации, поэтому материалы часто приходится завозить, что значительно удорожает проведение работ. Необходимо разрабатывать технологии создания рекультивационных материалов в районах выполнения работ. Проблемы возникают и при восстановлении растительности. На начальном этапе необходимо закрепить поверхность и запустить биологический круговорот, но набор видов растений, пригодных для рекультивации, очень ограничен. Поэтому используются злаковые травы, которые могут в данных условиях произрастать и выполнять почвозащитные функции. Это можно рассматривать как мелиоративный этап. В дальнейшем эти травы выпадают и замещаются местными видами естественным образом. Таким образом, в настоящее время есть понимание того, как выполнять рекультивацию в АЗРФ. Основной проблемой при этом остается сокращение затрат проведения рекультивации и повышение ее эффективности, направленной на восстановление органогенного корнеобитаемого слоя и видового состава естественных экосистем.

## Проект «TerrArctic»: анализ ключевых процессов секвестрации углерода экосистемами Арктики

*Соромотин А.В.<sup>1</sup>, Курганова И.Н.<sup>1,2</sup>, Филимоненко Е.А.<sup>1,2</sup> Лопес де Гереню В.О.<sup>1,2</sup>,  
Упорова М.А.<sup>1</sup>, Хорошаев Д.А.<sup>1,2</sup>, Кузяков Я.В.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

<sup>2</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пуццино, Россия

<sup>3</sup>Университет Георга Августа, Геттинген, Германия

e-mail: ikurg@mail.ru

Россия является одной из самых холодных стран в мире со среднегодовой температурой воздуха  $-4.1^{\circ}\text{C}$  в 1961–1990 гг., а около 2/3 ее территории расположено в зоне распространения вечной мерзлоты. Большинство климатических прогнозов констатирует повышение среднегодовой глобальной температуры воздуха к концу XXI века на  $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ , при этом потепление за полярным кругом будет происходить в 2–3 раза быстрее. В арктических широтах последствия глобального потепления наиболее очевидны и проявляются, в первую очередь, в деградации вечной мерзлоты и увеличении сезонно-талого слоя. Вследствие этого значительные запасы углерода (С), законсервированные в мерзлой почве, подвергаются ускоренной минерализации микроорганизмами. Соответственно, в ближайшем будущем тундра и особенно тундровые болота могут стать источником огромных объемов углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), поступающего в атмосферу и ускоряющего через систему обратных связей потепление климата.

Роль арктических и тундровых экосистем в планетарном балансе С велика и активно обсуждается в международном научном сообществе. Одни авторы рассматривают экосистемы северных широт как зону стока атмосферного  $\text{CO}_2$ , другие, напротив, считают арктические и тундровые биогеоценозы источником поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу [Карелин, Замолотчиков, 2008]. Традиционное представление о крайней замедленности всех биологических процессов в арктических почвах существует наряду с мнением о высокой респираторной и гидролитической активности почв северных широт, ограниченной лишь рамками короткого вегетационного периода. Несмотря на то, что показатели первичной продукции в тундровых экосистемах ниже, чем в остальных наземных экосистемах, в почвах высоких широт на единицу площади накапливается наибольшее количество углерода из-за сильно замедленных темпов разложения растительных остатков. Проект «TerrArctic» сфокусирован на изучении вклада биотических, экосистемных и антропогенных факторов, влияющих на круговорот углерода в экосистемах Арктики, включая пожары, перевыпас домашних северных оленей и нефтяные загрязнения.

Биотические факторы имеют большое значение для широкого спектра вопросов, таких как: (1) возможные механизмы и управление секвестрацией и стабилизацией С в криогенных почвах; (2) роль растительного покрова и почвенных микроорганизмов для секвестрации С в почвах в зоне многолетнемерзлых пород; (3) улучшение питания растений посредством микробной мобилизации питательных элементов; (4) ризодепозиция и фиторестаурация техногенных пустошей и участков, пострадавших от перевыпаса оленей, органических загрязнителей, включая нефтепродукты в районах нефтегазопромыслов и т.д. Биотические драйверы непосредственно влияют на микробную деятельность, обеспечивая наличие субстрата, который будет использоваться микроорганизмами и приведет к увеличению микробной биомассы и ее активности, изменению состава микробного сообщества и перестройке ферментного пула почв. Разложение почвенного органического вещества будет ускоряться при изменении активности микробной биомассы и состава микробиоценоза при поступлении корневых выделений, что повысит производство ферментов и ускорит минерализацию органического вещества почв.

Влияние абиотических факторов, таких как температура почвы и ее влажность на

протекание процессов минерализации органического вещества почв хорошо изучено и обычно проводится на базе инкубационных экспериментов [Kätterer et al, 1998]. В подобных исследованиях уровень выделения  $\text{CO}_2$  соотносят с температурой и влажностью проведения эксперимента. Точные значения температурной чувствительности ( $Q_{10}$ ) минерализации органического вещества криогенных почв не получены до сих пор, а вопрос, являются ли абиотические факторы, такие как температура и влажность почвы единственными факторами, влияющими на разложение органического вещества в почве, требует дополнительных исследований. В рамках реализации проекта «TerrArctic» установлено, что температурная чувствительность скорости минерализации  $C$  в органогенном горизонте почв тундры и лесотундры составляет 2.9, а в минеральном горизонте – 3.0. Природные пожары и перевыпас северных оленей приводят к увеличению  $Q_{10}$  на 0.1 единицы в обоих почвенных горизонтах, делая органическое вещество в них более чувствительным к глобальному потеплению.

Наблюдаемые сегодня изменения климата в северных широтах увеличивают риск возникновения пожаров, поэтому оценки секвестрации  $C$  в криогенных почвах необходимо проводить с учетом пирогенного  $C$ . Это наиболее актуальный аспект исследований, проводимых в рамках проекта «TerrArctic». Потери  $C$  в результате увеличения интенсивности, площади и частоты пожаров, обусловленной глобальным потеплением, оказывают значительное влияние на баланс  $C$  в биоме тундр. Исследования термоокислительной стабильности органического вещества почв тундры и лесотундры показывают, что в постпирогенных почвах по сравнению с контрольными увеличивается доля сверхустойчивого пула углерода в органическом горизонте – в 2.1 раза, а в верхней части минерального слоя – в 1.3 раза. В составе почвенного органического вещества сверхустойчивый пул составляет 0.5–2.5%, но его высочайшая степень устойчивости к микробному разрушению и, соответственно, очень длительное время оборота в почве, делают его критически важным элементом для оценки секвестрации углерода постпирогенными почвами Арктики.

Подсчеты секвестрации углерода с учетом пирогенного  $C$  являются абсолютно новым аспектом изучения тундровых почв в арктическом регионе Западной Сибири и России в целом. Потери углерода из экосистем, вызванные пожарами, могут привести к полному изменению баланса и стабильности  $C$  в северных почвах. Мы предполагаем, что ежегодное поступление пирогенного  $C$  намного меньше ежегодной секвестрации углерода в тундре, но его исключительная стабильность ведет к более высокой относительной аккумуляции пирогенного  $C$  в почве за длительные периоды времени. Таким образом, круг вопросов, изучаемых в проекте «TerrArctic», является основополагающим для оценки секвестрации  $C$  в криогенных почвах и потоков  $\text{CO}_2$  в арктических экосистемах. Полученные результаты дают возможность делать научно-обоснованные прогнозы при потеплении климата и изменении землепользования в арктическом регионе. в условиях наблюдаемых климатических изменений.

*Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г.* Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука. 2008. 344 с.

*Kätterer T., Reichstein M., Andren O., Lomander A.* Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different model // *Biol. Fertil. Soils.* 1998. V. 27. P. 258-262.

**СЕКЦИЯ 1.****ГЕНЕЗИС, ЭВОЛЮЦИЯ И ПРОБЛЕМЫ  
КЛАССИФИКАЦИИ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ****Почвы Новосибирских островов и некоторые проблемы их классификации**

*Адриан И.А.*

*ФГБУ «Государственный природный заповедник "Усть-Ленский"»*

*e-mail: i\_yakshina@rambler.ru*

Архипелаг Новосибирские острова находится на границе двух морей – Лаптевых и Восточно-Сибирского. В 1995–2019 гг. нами проводились полевые исследования почв этих островов.

Идентифицированы и классифицированы почвы следующих территорий. 1. Остров Жохова: весь остров. 2. Остров Котельный: долина верхнего и среднего течения реки Балыктах и прилегающих территорий; северо-западное, западное побережье, долины рек Пшеницына, Чукочьей, Соколова, Куччугуй-Сулбут. 3. Земля Бунге: южное побережье, район полярной станции «Земля Бунге» (кратковременные исследования). Остров Фаддеевский: северо-восточное побережье от Стрелки Анжу до м. Благовещенский. 4. Остров Новая Сибирь: юго-западное побережье от м. Рожина до Деревянных Гор, кратковременное обследование почв м. Плоский; юго-восточное побережье от м. Песцовый до м. Поворотный и 5 км западнее него, среднее течение р. Малая Надежная, маршрутное обследование почв м. Каменный; район м. Гористый и м. Жилой. 5. Остров Большой Ляховский: долина нижнего и среднего течения реки Зимовье и прилегающие территории; южное побережье от р. Зимовье до м. Кигилях.

При диагностике и классификации почв мы опирались на классификацию почв, разработанную Л.Г. Еловской [Еловская, 1987]. Однако результаты специальных почвенных исследований, проведенных во многих районах Новосибирских островов впервые, выявили некоторые особенности, не нашедшие отражения в данной классификации, что заставило нас внести в нее некоторые дополнения (в табл. 1 эти дополнения выделены полужирным курсивом).

Наибольшее распространение на островах имеют почвы отделов криотурбированные и глеевые, а также слаборазвитые (примитивные). На типовом уровне преобладают тундровые надмерзлотно-глеевые, тундровые криотурбированные (неоглеенные) и торфяно-глеевые. В долинах рек развиты аллювиальные торфяно-глеевые и аллювиальные дерновые, а также аллювиальные слоистые слаборазвитые, в аласах – аласные торфяно-глеевые и дерново-глеевые. По морским побережьям локально встречаются маршевые почвы.

Особенностью почв холодных областей, среди прочего, является замедленность процессов торфо- и гумусонакопления. Если, согласно классификации Л.Г. Еловской, к торфянистым почвам относятся таковые с мощностью торфа 8–20 см, то почвы с меньшей его мощностью автоматически относятся к слаборазвитым. Однако эти почвы находятся рядом, в одинаковых гидротермических условиях и под воздействием одних и тех же почвообразующих процессов. Их отличие состоит только в мощности торфяного горизонта.

На уровне нового типа в отделе «Маршевые» выделены Мерзлотные маршевые иловато-глеевые почвы. На уровне новых подтипов выделены следующие: отдел «Аллювиальные», тип «Мерзлотные аллювиальные торфяно-глеевые» – подтип «Мерзлотные аллювиальные иловато-глеевые».



В отдел «Слаборазвитые» добавлен подтип «Криотурбированные» (при наличии ярко выраженных криотурбаций), а также подтипы (в зависимости от почвообразующих пород) «Маршевые», «На аласных отложениях», «На морских глинах», «На морских песках», «На каолиновых глинах», «Элюво-делювиальные».

Отдел	Порядок	Тип	Подтип
Слаборазвитые (примитивные)	Примитивные собственно	Каменистые	<i>Элюво-делювиальные</i>
		Глинистые	<i>На морских глинах</i>
		Глинистые	Делювиальные
		Суглинистые	<i>На аласных отложениях</i>
		Песчаные	<i>На морских песках</i>
	Суглинистые	<i>Криотурбированные</i>	
	Примитивные аллювиальные	Слоистые	Слоистые
Аллювиальные	Аллювиальные собственно	Мерзлотные аллювиальные торфяно- глеевые	Мерзлотные аллювиальные торфяно-глеевые
			Мерзлотные аллювиальные торфянисто-глеевые
			<i>Мерзлотные аллювиальные иловато-глеевые</i>
		Мерзлотные аллювиальные дерновые	Мерзлотные аллювиальные дерновые перегнойные
		Мерзлотные аллювиальные дерновые глееватые	
Маршевые	Маршевые	<i>Мерзлотные маршевые иловато- глеевые</i>	<i>Мерзлотные маршевые иловато- глеевые</i>
Мерзлотные аласные	Мерзлотные аласные собственно	Мерзлотные аласные торфяно-глеевые	Мерзлотные аласные торфянисто- глеевые
		Мерзлотные аласные дерново-глеевые	Мерзлотные аласные дерново- глееватые
Мерзлотные криотурбированные	Мерзлотные криотурбированные деформированно- профильные	Тундровые надмерзлотно- глеевые	Тундровые надмерзлотно- глееватые
	Мерзлотные криотурбированные деструктивно- профильные	Мерзлотные излившиеся	Тундровые торфянисто- перегнойно-глееватые
Глеевые	Гумусово-глеевые	Мерзлотные торфяно- глеевые	<i>Мерзлотные иловато-глеевые</i>
			Мерзлотные торфянисто-глеевые
Органические переувлажненные	Торфяные низинные	Мерзлотные торфяные низинные	Мерзлотные торфяные низинные

**Табл. 1.** Систематический список почв Новосибирских островов.

**Примечание:** полужирным курсивом выделены вновь введенные таксоны, не указанные в соответствующих классификациях.

Еловская Л.Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск, 1987. 172 с.

## Общие параметры экологических ниш палевых и криоаридных почв на южной границе криолитозоны Забайкалья

*Бадмаев Н.Б.<sup>1,2</sup>, Гынинова А.Б.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН,*

<sup>2</sup>*Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова,  
e-mail: nima\_b@mail.ru*

Почвенный покров представлен как система объектов, расположенных в n-мерном экологическом гиперпространстве, осями которого выступают факторы почвообразования (Бадмаев, 2008). Каждый тип почвы может формироваться лишь внутри определенной амплитуды значений каждого фактора. Крайние значения определяют тот объем многомерного пространства, который и может быть определен как экологическая ниша типа почвы. На основе разработанного информационно-картометрического подхода удалось дифференцировать континуальный и чрезвычайно неоднородный контрастный почвенный покров шести полигонов-трансектов юга Витимского плоскогорья (ЮВП) и севера Селенгинского плоскогорья (ССС) Забайкалья в соответствии с факторами почвообразования, определить общие параметры топоэкологических ниш и значительно расширить (см. таблицу) ареалы отдела палево-метаморфических почв по Новой классификации почв России [2004, 2008].

Ареной холодного и гумидного почвообразования являются лесные и лугово-степные ландшафты с одной стороны, сухого и экстроконтинентального почвообразования с другой. По атмосферному увлажнению крайние позиции занимают криоаридные почвы с одной стороны и мерзлотные палевые – с другой.

Пространственная и информационная границы по осадкам проявляется на величине 250-350 мм, по сумме температур выше 10°C на величине 1400°C, ниже которых формируются сезоннопротаивающие (мерзлотные), выше сезоннопромерзающие (холодные) почвы.

В систему «почва-климат» для более полной оценки влияния климата как фактора почвообразования дополнен «мерзлотный субфактор» через глубину протаивания и промерзания почв. Представленные материалы свидетельствуют о тесной зависимости глубины протаивания и промерзания от гранулометрического состава материнских пород и типа растительности. Отчетливо выделяются две зоны: сезоннопротаивающие палевые почвы на палеоген-неогеновых отложениях тяжелого гранулометрического состава и сезоннопромерзающие холодные криоаридные почвы на продуктах выветривания щелочистых нижнепалеозойских гранитоидах легкого гранулометрического состава. Первая группа почв занимают пологие склоны северных экспозиций под лиственнично-березовыми лесами средних частей (палевые – 2.3-2,5 м). Эти почвы представляют Еравнинско-Телембинский котловинный почвенный округ ЮВП в пределах переходной зоны от островного к сплошному распространению многолетней мерзлоты. Вторая группа почв формируются в условиях засушливого холодного климата под степной растительностью на продуктах выветривания массивно-кристаллических пород. Наиболее глубоко сезонно промерзают криоаридные почвы (3-4 м) на элювиальных и делювиальных породах супесчано-суглинистого состава Кижингинско-Шилкинского почвенного округа ССС в условиях островного распространения многолетней мерзлоты (мощностью 50-30 м).

Палевые почвы занимают располагаются в центральной части Якутии под лиственничными лесами в условиях сплошного распространения многолетней мерзлоты. Выявленные палевые мерзлотные почвы формируются на пологих склонах северных экспозиций под березовыми лесами, где встречаются тяжелосуглинистые продукты выветривания вулканических пород палеоген-неогенового возраста и близкое залегание мерзлоты. Экологической нишей криоаридных почв с неполным хрящевато-щебнистым профилем являются крутые склоны ЮВП и увалы южной экспозиции ССС под криоксерофитными степями на плотных каменистых породах, продуктах разрушения нижне-

палеозойских гранитоидов. Эти почвы В.И. Волковинцер [1978] выделял на склонах теплых экспозиций только в пределах высоких хребтов Алтая, Саяна, Сунтар-Хаята и Тянь-Шаня. Ранее выделяемые каштановые почвы занимают более пологие ландшафты под ксерофитными степями и характеризуются полным профилем и ярко выраженным карбонатным горизонтом. В настоящее время по тем же местоположениям разрезов и собственным данным по криоаридным почвам как генетическому типу в Классификации почв России дана подробная характеристика их географии, морфологии и диагностики [Бронникова, Герасимова, Конопляникова и др., 2022].

Фактор	Палевые	Криоаридные
<i>I. Материнская порода</i> По генезису По гранулометрическому составу	Делювий, Делювий са тс, гл	Элювий, Д, Дса, R сп, лс, с, камни
<i>II. Растительность</i>	Березовые леса с лиственницей, ерниками и разнотравием	Криоксерофитная степь, ПП от 80-30%
<i>III. Рельеф</i> Высота Экспозиция Крутизна Положение в ландшафте (фация)	969-991 Северная и с-запад., с-восток. 2-3, 3-5 т-э, т-а	730-820, 875-890 Южная, ю-з, ю-в 3-5, 5-8, 8-10 т-э, т-а, э
<i>IV. Климат</i> Глубина протаивания, см Глубина промерзания, см Испаряемость, мм	230-250 - 445-470	- 300-400 523-540
Классификация и диагностика почв СССР, 1977	Мерзлотные лугово-лесные	Черноземы мучнисто- карбонатные
Классификация и диагностика почв России, 2004, 2008	Палевые темногумусовые мерзлотные	Криоаридные
WRB	Cambic Calcic Cryosols (Siltic, Humic)	Skeletal Cambisols (Protocalcic)

Табл. 1. Параметры топокэкологических ниш отдела палево-метаморфических почв ЮВП и ССС Забайкалья

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта НИР № 121030100228-4 ИОЭБ СО РАН и гранта РФФИ №№ 19-29-05250.

*Бадмаев Н.Б.* Координатный анализ и принципы распознавания почв. Улан-Удэ: Изд-во Бурят. гос. ун-та, 2008. 206 с.

*Волковинцер В.И.* Степные криоаридные почвы. – Новосибирск: Издательство «Наука», Сибирское отделение, 1978. – 208 с.

Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с. Полевой определитель почв России. – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. – 182 с. *Бронникова М.А., Герасимова М.И., Конопляникова Ю.В., Гуркова Е.А., Черноусенко Г.И., Голубцов В.А., Ефимов О.Е.* Криоаридные почвы как генетический тип почв в классификации почв России: география, морфология, диагностика // Почвоведение. 2022. № 3. С. 263-284.

## Тенденции и динамика развития почв тундр севера Якутии в условиях климатических колебаний голоцена и антропогенных нагрузок

Губин С.В.

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
Пушино, Московская область, Россия  
e-mail: gubin.stas@mail.ru*

В условиях арктических и типичных тундр севера Якутии выявлены два тренда почвообразования – криоземный и глеевый. Криоземный возникает на водоразделах и в верхних частях склонов суглинистых едомных возвышенностей в условиях дополнительного дренажа и хорошо выраженного нанополлигонального рельефа. Здесь, при залегании границы многолетней мерзлоты на глубине 60-70 см, формируются криоземы. Тренд глеевого почвообразования реализуется в аласных котловинах - на днищах сошедших термокарстовых озер и их террасах. Аласные котловины занимают до 70% приморских низменностей севера Якутии. Мощности СТС в их профилях составляют 20–50 см.

Формирование почв на поверхности едомных возвышенностей, сложенных отложениями ледового комплекса и проработанных синлитогенным почвообразованием, началось в начале голоцена. В оптимум голоцена мощности деятельного слоя в тундровой зоне достигали 1-1,2 м и почвообразование шло по типу глеевого. В последующие эпохи голоцена произошло сокращение глубин оттаивания. Образование криоземов неразрывно связано с формированием и развитием нанополлигонального рельефа и с криотурбационными процессами, ведущим из которых является пятнообразование. Осенью в условиях маломощного снегового покрова (или даже полного отсутствия снега) при резком и быстром падении температур воздуха (ниже  $-20$  –  $-30^{\circ}\text{C}$ ) в течение нескольких суток идет активное промерзание почв нанополлигонов. Оно идет как с поверхности, так и со стороны межполлигональных микрозападин. При образовании значительных объемов льда внутри нанополлигонов здесь резко возрастает криостатическое давление, и по образовавшимся трещинам происходит выдавливание еще незамерзшего материала на поверхность. Ведущиеся с середины 80-х годов наблюдения за состоянием почвенного покрова на ряде ключевых участков в типичных тундрах Колымской низменности показали, что периоды формирования свежих пятен здесь совпадают с годами резкого понижения температуры воздуха в октябре месяце. Есть основания полагать, что численность образующихся пятен связана со значениями температур в этот месяц. С середины 90-х годов численность свежих, незадернованных пятен на территории тундр на Колымской низменности резко сокращается, что может быть связано с изменением здесь погодных условий – отсутствием резких низкотемпературных похолоданий в начале промерзания, формированием в этот период достаточно мощного снежного покрова.

На участках едомных возвышенностей, активно и регулярно используемых для выпаса оленей, нарушения животными поверхности свежих или зарастающих нанополлигонов в летний период активизирует процесс пятнообразования. В подобной ситуации разрыв и излияние материала часто происходит в краевых частях поверхности нанополлигонов, что влечет попадание его в межнанополлигональные понижения и способствует частичному временному выравниванию нанополлигонального рельефа.

Анализ строения криоземов с надмерзлотными аккумулятивными органоминеральными горизонтами, полученные радиоуглеродные датировки его материала показывают, что процессы пятнообразования обладали наибольшей своей активностью около 4-2 тыс. лет назад т.е. реализовались в суббореальный период.

Развитие почв на днищах аласных котловин определяется временем последнего схода озер, на их склонах – возрастом находящихся здесь террас. На днищах и низких террасах в условиях повышенного гидроморфизма, развития осоково-моховой растительности и

осокового кочкарного рельефа идет устойчивое формирование торфяных почв и торфяно-глееземов. На террасах среднего уровня, возраст которых можно оценить средним голоценом, в условиях начальных стадий развития нанополлигонов торфяные почвы эволюционируют в торфяно-глееземы. На террасах высокого уровня, их склонах с возрастанием степени дренированности и оформленности нанополлигонального рельефа в почвенном покрове торфяно-глеевые почвы постепенно переходят в торфяно-криоземы сохраняя слабые признаки оглеения. Влияние климатических изменений в голоцене на формирование и свойства почв аласных котловин выявить не удалось, что определяется устойчивым доминированием в эти эпохи процессов торфо- и глееобразования. На обособленных дренированных останцах террас аласных котловин ранне- и среднеголоценового возраста доминируют криоземы. Таким образом, на фоне биоклиматических изменений в голоцене срок, необходимый для трансформации торфяно-глеевых почв в зрелые криоземы, может быть оценен 4-5 тысячами лет.

Умеренные традиционные хозяйственные нагрузки – выпас оленей, лошадей – не оказывают существенного влияния на организацию почвенного покрова аласных котловин. Наиболее существенные нарушения здесь связаны с использованием тяжелого гусеничного транспорта в теплые периоды года и особенно пожары. Их следствием при близком залегании мерзлоты является резкая активизация оползневых явлений, крипа, солифлюкции, суффозии, нарушающих строение профилей или приводящих к их полному уничтожению.

## Органоминеральные взаимодействия в перигляциальных и супрагляциальных системах оазиса Холмы Бангера (Восточная Антарктида)

*Долгих А.В., Шоркунов И.Г., Мергелов Н.С., Зазовская Э.П., Турчинская С.М., Горячкин С.В.  
Институт географии РАН, Москва, Россия  
e-mail: dolgikh@igras.ru*

Оазис Холмы Бангера является вторым по величине после Сухих долин и имеет площадь около 900 км<sup>2</sup>. Он характеризуется сходными климатическими факторами и условиями как с береговыми (Холмы Ларсеманн, Холмы Тала), так и с зашельфовыми (Ширмахера) оазисами, максимальная глубина сезонно-талого слоя многолетнемерзлых пород составляет более 120 см. Отсутствие колоний пингвинов и небольшие популяции южнополярного поморника и снежного буревестника обуславливают крайне незначительный орнитогенный привнос органического вещества. Лишь локально в небольших укрытиях обнаруживаются скопления орнитогенного материала. Важной геохимической особенностью оазиса является обширное распространение на поверхности почв солевых мелкокристаллических инкрустаций двух групп: карбонатно-хлоридно-сульфатного и преимущественного карбонатного состава.

Основные типы почв, представленные в оазисе Холмы Бангера, сходны и близки к почвам других ранее изученных оазисов Восточной Антарктиды, но различия проявляются уже в почвенном покрове. Длительное развитие оазиса в перигляциальной зоне привело к формированию крупных ровных поверхностей межрядовых долин и межсочных котловин. Основные типы почв, представленные в оазисе Холмы Бангера аналогичны почвам ранее изученных оазисов Восточной Антарктиды. Почвенный покров Холмов Бангера имеет мозаичное строение, которое определяется не широтой и удаленностью от океана или ледника, а локальными условиями почвообразования. Гиполитные органогенные горизонты, в отличие от оазиса Холмы Ларсеманна встречаются, крайне редко, что связано с преимущественно суглинистым составом рыхлых пород и их темным цветом.

Оазис Холмы Бангера представляет собой более засушливый вариант среднеантарктических криптогамных снежниковых пустошей. В таких экстремальных условиях формируются органоминеральные комплексы, в которых важную роль играют глинистые минералы. Наиболее развитые почвы (литозёмы перегнойные и торфяно-литозёмы) располагаются в ветровых убежищах и формируются в локально благоприятных гидрологических условиях под мощными моховыми покровами. Однако такие почвы занимают менее 0,1% территории оазиса. Органическое вещество (ОВ) поверхностных органогенных горизонтов мощностью до 10 см почв ветровых убежищ имеет радиоуглеродный возраст более 1000 лет, а радиоуглеродный возраст ОВ в срединных альфегумусовых горизонтах – более 2500 лет. В супрагляциальных обстановках на абляционных поверхностях выводного ледника Эдисто в западной части оазиса широко представлены органоминеральные образования (например, мелкозем с цианобактериальными биопленками). После отступления ледника в ветровых убежищах на молодых экспонированных поверхностях создаются наиболее благоприятные условия для развития мохово-лишайниковых покровов. Органогенные горизонты таких почв мощностью до 3 см имеют современный радиоуглеродный возраст. Проведенные радиоуглеродные исследования ОВ позволяют предположить, что такие почвы могут содержать органоминеральный материал супрагляциального генезиса, который способствует развитию почвенных процессов в перигляциальной обстановке.

### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00212.

## Возраст и особенности генезиса постпирогенных почв горных тундр Полярного Урала

*Жангуров Е.В.<sup>1</sup>, Шамрикова Е.В.,<sup>1</sup> Панюков А.Н.<sup>1</sup>, Королев М.А.<sup>1</sup>, Лесовая С.Н.<sup>2</sup>,  
Лебедева М.П.<sup>3</sup>, Гольева А.А.<sup>4</sup>, Новенко Е.Ю.<sup>5</sup>, Зазовская Э.П.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар, Россия*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>3</sup>*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Институт географии РАН, Москва, Россия*

<sup>5</sup>*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*e-mail: zhangurov@ib.komisc.ru*

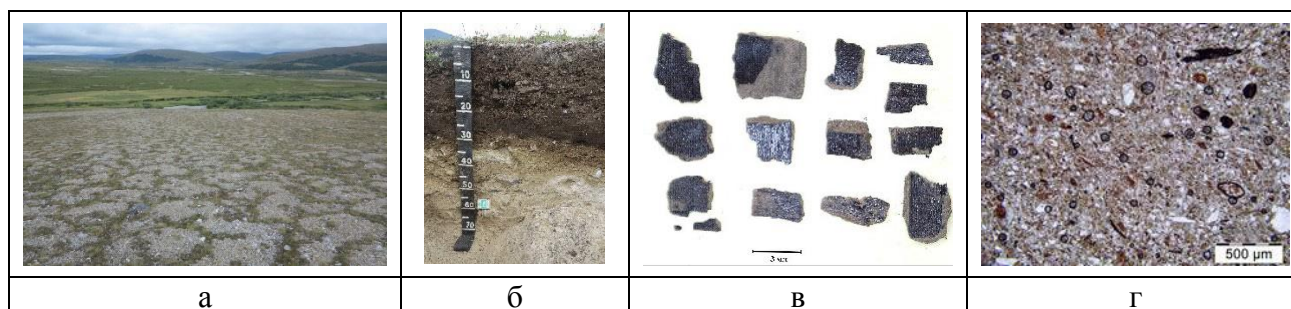
Несмотря на длительную историю исследований, почвенно-растительный покров Полярного Урала, особенно в труднодоступных районах, остается недостаточно изученным. Немногочисленные литературные данные по палеогеографии региона в основном охватывают анализ палинологических, стратиграфических материалов, радиоуглеродных датировок мерзлотных торфяников и древнеозерных отложений. Имеются сведения как об общих, так и о специфических чертах палеогеографии голоцена северной оконечности Уральского хребта в сравнении с сопредельными равнинными территориями. Цель работы – уточнение генезиса и эволюции почв горно-тундровых ландшафтов Полярного Урала на карбонатных породах.

Район исследований расположен в северной части хребта Большой Пайпудынский (67°13' с.ш. и 65°28' в.д.) и находится в 70 км к северу от Полярного круга. Экспедиционные работы проведены в 2018-2021 гг. Объектами исследований выбраны почвы на высотном геоморфологическом профиле: от вершины до основания склона, сформированные на элювиально-делювиальной толще мраморизованных известняков и на переотложенных супесчано-легко-(средне)суглинистых породах в условиях карстовых воронок. Заложено 8 почвенных разрезов, в каждой точке наблюдения выполнены геоботанические описания. В растительном покрове широко представлены дриадовые, дриадово- и осоково-моховые сообщества горных тундр с криогенно-пятнистым (полигональным) микрорельефом.

Для образцов почв и углистых частиц (УЧ) выполнены следующие исследования: радиоуглеродное датирование методом ускорительной масс-спектрометрии (IGAN<sub>AMS</sub>); фитолитный и спорово-пыльцевой анализы; микроморфологические описания с использованием микроскопа Olympus BX51 с цифровой камерой Olympus. Просмотр, определение форм, размеров и сохранности структуры УЧ проведены с помощью цифрового USB-микроскопа Digital Microscope (ув. от 20 до 300x) с камерой 5 Мрх. Илистые фракции (<0.001 мм) после разрушения карбонатов выделены по методу Горбунова. Съемка ориентированных образцов выполнена на приборе Rigaku MiniFlex II (Rigaku Corporation, Токуо, Japan) X-гау дифрактометр (XRD).

В ходе морфологических описаний выявлена сложная система горизонтов и подгоризонтов, что и на небольшом расстоянии в значительной мере определяет разнообразие типов и подтипов почв, а также пространственную вариабельность верхних и срединных горизонтов. Вследствие высокой щебнистости, наличия карбонатных пород по всему профилю и провальной фильтрационной способности почв мерзлота отсутствует. Почвы (отделы: литоземы, органо-аккумулятивные, криометаморфические, глеевые) характеризуются отчетливой дифференциацией на генетические горизонты, бурно вскипают по всему профилю от воздействия 10%-ной HCl. Общей особенностью является наличие интенсивно темноокрашенных пирогенных горизонтов, локализованных в виде погребенных слоев как в верхней (5-30 см), так и в средней и нижней частях почвенных разрезов. Фрагменты УЧ отличаются от минеральных темноокрашенных частиц гумусовых горизонтов черным цветом (2.5Y N2/ black; 10YR 2/1 black), светоотражающей способностью, формой и размерами (рис. 1). При прикосновении пинцетом древесный уголь относительно легко

разбивается на небольшие угловатые фрагменты с различной структурой древесины. Характер распределения УЧ по почвенным профилям во многом определяется локальными факторами (микрорельеф, содержание щебня известняков и др.), определяющими возможность их вертикальной и / или горизонтальной миграции.



**Рис. 1.** Ландшафт (а), перегнойно-темногумусовая почва (б), углистые частицы (УЧ) (в), УЧ в уплотненном глинисто-карбонатно-пылеватом материале (г).

Согласно радиоуглеродному датированию, возраст почв составляет  $3040 \pm 70$  лет, углистого материала –  $6340 \pm 30$  лет. В спорово-пыльцевых спектре пирогенных горизонтов (АН<sub>пр</sub>) преобладает пыльца в настоящее время отсутствующих в сопредельных ландшафтах деревьев и кустарников, таких как древесная береза (*Betula sect. Albae*), карликовая березка (*Betula nana*), ольховник (*Duschekia fruticosa*), сосна (*Pinus* subgen *Harpoxylon* и *P. subgen Diploxylon*). Среди травянистых растений определена пыльца представителей семейств Cyperaceae, Poaceae, Ariaceae, Ericaceae и др. Полученные нами результаты согласуются с данными [Суровой с соавт., 1975] по спорово-пыльцевому анализу этого района Полярного Урала.

Реликтовый педогенез в более теплый период развития ландшафтов также диагностируется по включению углистой крошки внутрь трещиноватых карбонатных обломков и по признакам растворения и перекристаллизации породных фрагментов кальцита. Глинистые минералы представлены хлоритом, диоктаэдрическими слюдами, в небольшом количестве каолинитом. Сметитовая фаза включает смешанослойные образования с высоким (> 50%) содержанием сметитовых пакетов. Среди неглинистых минералов присутствуют кварц и полевые шпаты. Профильная дифференциация минеральных фаз проявляется в уменьшении доли сметитовой фазы в дерновых горизонтах по сравнению с горизонтами CRM. Из неглинистых минералов присутствуют кварц и полевые шпаты.

Достаточно мощный (30-35 см) слой пирогенных горизонтов (рис. 1) свидетельствует о серии продолжительных (циклических) палеопожаров на рубеже позднеатлантического/суббореального периодов голоцена и широкого распространения здесь лиственнично-еловых (сосновых) растительных формаций.

Использование комплекса методов и подходов позволило диагностировать разное проявление и сочетание элементарных почвообразовательных процессов и выявить сложный полигенетический профиль развития отдельных типов почв Полярного Урала.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена в рамках бюджетной темы НИР № 122040600023-8.

Сурова Т.Г., Троицкий Л.С., Пуннинг Я.М. Палеогеография и абсолютная хронология голоцена Полярного Урала // Известия АН ЭССР. Химия-геология. 1975. № 2. С. 152-159.



## Особенности почв дренированных озерных котловин Большеземельской тундры

*Каверин Д.А.<sup>1</sup>, Денева С.В.<sup>1</sup>, Пастухов А.В.<sup>1</sup>, Якубенко С.В.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар, Россия*

*<sup>2</sup>Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина,*

*Сыктывкар, Россия*

*e-mail: dkav@mail.ru*

Охарактеризованы особенности строения, свойств и температурных режимов почв, функционирующих в двух различных осушенных озерных котловинах Большеземельской тундры. Район исследований расположен в пределах Печорской низменности (юго-восток Большеземельской тундры), в Косью-Роговской низменной равнине. Многолетнемерзлые породы мощностью до 70 метров занимают более 90% территории урочища. Их среднегодовая температура находится в диапазоне 0...-2 °С [Kaverin et al., 2017]. В пределах обеих котловин исследовано тринадцать участков. На каждом участке проведено морфологическое описание почвенных разрезов, описание растительности, ландшафтной обстановки и криогенных процессов.

Строение, свойства и температурные режимы почв дренированных озерных котловин сильно дифференцированы в зависимости от состава почвообразующих пород, специфики развития ландшафтов и проявления современных криогенных процессов. В пределах озерной котловины с минеральными (глинистыми и песчаными) донными отложениями сформировались почвы, характерные для южных тундр европейского северо-востока России. Мерзлотные почвы в минеральной котловине локально развиты на дренированных участках с суглинистыми отложениями. Наличие маломощного (до 20 см) поверхностного органогенного горизонта обеспечивает торфяно-глееземам, функционирующим как экосистемно-модифицированные мерзлотные почвы, частичную защиту от протаивания. На дренированных песчаных буграх развиты холодные почвы с заглубленной кровлей многолетнемерзлых пород и выраженными сезонными колебаниями температуры в течение года. Почвы минеральной котловины достаточно кислые ( $pH_{H_2O}=4-5$ , гидролитическая  $23\pm 6$  и обменная кислотности –  $6,5\pm 2,0$  мг-экв/100 г почвы), сильно насыщены основаниями ( $53\pm 5\%$ ), содержат умеренное количество (5-6 %) органического углерода в минеральных горизонтах.

В котловине с органо-минеральными отложениями сформировались уникальные для Большеземельской тундры почвы – торфоземы минерально-торфяные. В котловине с заиленной торфяной толщей ландшафтные условия для формирования и сохранения мерзлотных почв наиболее благоприятны. Наличие мощной (до 1 м) толщи торфа предохраняет почвы от протаивания в летний период, мерзлотные почвы функционируют как экосистемно-защищенные профили. Мерзлотные торфоземы отличаются мягкостью температурного режима при малой глубине сезонного протаивания. По физико-химическим свойствам они характеризуются высокими показателями зольности (40-50%), слабокислой реакцией ( $pH_{H_2O}$  5-6), умеренным для торфа содержанием органического углерода (20-30%) и соотношением C/N (до 20). Подстилающие торф глеевые многолетнемерзлые горизонты отличаются слабокислой или нейтральной реакцией, высокой степени насыщенности основаниями (60-70%) и малым содержанием углерода (до 4%). Несмотря на значительные различия, в обеих котловинах на дренированных участках сформировались мерзлотные почвы, защита от протаивания в которых обеспечивается преимущественно органогенными горизонтами разной мощности. В целом почвы дренированных котловин отличаются высокой зольностью, содержанием обменных оснований, слабым обогащением гумуса азотом.

**БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование выполнено при поддержке темы НИР № 122040600023- 8 «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв бореальных и арктических экосистем европейского Северо-Востока в условиях антропогенных воздействий, глобальных и современных региональных климатических трендов».

*Kaverin D.A., Melnichuk E.B., Shiklomanov N.I., Kakunov N.B., Pastukhov A.V., Shiklomanov A.N.* Long-term changes in the ground thermal regime of an artificially drained thaw-lake basin in the Russian European north // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017, Vol. 29, P. 49–59, DOI: 10.1002/ppp.1963.

## Криогенные признаки в профиле криоаридных почв

*Конопляникова Ю.В.<sup>1</sup>, Бронникова М.А.<sup>1</sup>, Лебедева М.П.<sup>2</sup>, Герасимова М.И.<sup>2,3</sup>, Васина А.И.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Институт географии РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Почвенный институт имени В.В. Докучаева, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*e-mail: konoplianikova@igras.ru*

Криоаридные почвы формируются под горными криоксерофитными степями в условиях ультраконтинентального аридно-семиаридного климата преимущественно на скелетных субстратах легкого гранулометрического состава на территории Северо-Восточной и Центральной Азии [Волковинцер, 1978]. В настоящее время криоаридные почвы как почвенный тип включены в Классификацию и диагностику почв России в составе отдела палево-метаморфических почв с характерным набором горизонтов АК-BPL-BCAic [Классификация..., 2004]. Но этот тип почв все еще остается одним из наименее изученных.

Проблема вклада криогенеза в формирование их профиля является нерешенных частных вопросов генезиса криоаридных почв. В.И. Волковинцер отмечал слабую выраженность криогенных процессов в профиле ввиду дефицита влаги: «Процессы криогенного перераспределения веществ в почвенном профиле не получают сколь-либо значимого развития» [Волковинцер, 1978], однако в последующих работах обсуждалось возможное участие криогенных процессов в формировании профиля криоаридных почв, в частности вклад криогенеза в формирование структуры и микроструктуры, трещинной сети, в изменения гранулометрического состава (криогенное дробление и сортировка) [Быстряков, Кулинская, 1980].

Основу работы составляет иерархический морфогенетический анализ почв (особое внимание уделяется почвенной микроморфологии), объектами послужили профили криоаридных почв Алтая, Тувы и Якутии.

Установлено, что в формировании профиля криоаридных почв важную роль играют криогенные признаки: полигональное растрескивание поверхности, криогенная сортировка, криогенное дробление минеральных зерен, силикатные кутаны на верхних гранях крупных обломков и вокруг мелких зерен, ооидные микроагрегаты, формирование постшлировой текстуры. Стоит отметить, что криогенные ооидные агрегаты в криоаридных почвах имеют небольшой размер (до 250 мкм) и не всегда хорошо оформлены. Повсеместно распространенный в криоаридных почвах признак, отсутствующий в описании типа в Классификации и диагностике почв России [2004], – пылевато-глинистые пленки, покрывающие различные поверхности. В большинстве случаев это грани скелетных зёрен, реже – осколки карбонатных кутан и растительные остатки. Эти признаки максимально выражены в горизонте BPL. Материал данных плёнок соответствует материалу мелкозема вмещающего горизонта, их образование происходит в результате криогенной перегруппировки мелкозема, о современности данного процесса свидетельствует наличие таких плёнок на растительных остатках. Наличие в горизонтах криоаридных почв переходных форм между минеральными зёрнами с мощной пылевато-глинистой («суглинистой») пленкой и ооидным агрегатами свидетельствует о том, что эти формы образованы в результате единого процесса криогенной перегруппировки материала. Криогенные признаки в профиле криоаридных почв получают наибольшее развитие в наименее аридных и наиболее тяжелых по гранулометрическому составу почвах с лучшей водоудерживающей способностью, в более аридных условиях они выражены слабее. Эти признаки отличают криоаридные почвы от каштановых, но выражены они хуже по сравнению таковыми в палевых почвах. Аридные (влаждефицитные) условия формирования криоаридных почв определяют отсутствие криотурбаций, в том числе языковатости, которая характерна для палевых почв.

Еще один частный вопрос, касающийся возможного вклада криогенеза в морфогенез

криоаридных почв, – возможность криогенной аккумуляция карбонатов, новообразования которых (кутаны, «бородки» на обломках пород) являются одним из важных диагностических признаков этих почв и внутрипочвенным «архивом» природных изменений. Оценка вклада криогенеза в формирование карбонатных кутан криоаридных почв проводилась путем сравнения морфологии природных кристаллов кальцита с криогенными формами, полученными в результате проведенного эксперимента при промораживании насыщенного раствора карбоната кальция при температурах  $-5^{\circ}\text{C}$  и  $-14^{\circ}\text{C}$ . Субмикроморфологические исследования строения экспериментально полученных кристаллов кальцита на сканирующем электронном микроскопе обнаружили широкое разнообразие полученных криогенных форм: при промораживании на  $-5^{\circ}\text{C}$  образовались преимущественно сростки и агрегаты (размером до 20 мкм) пластинчатых кубических, гексагональных и ромбоидных кристаллов, при промораживании на  $-14^{\circ}\text{C}$  образовалось много мелких кристаллов кальцита неправильной формы, а также пластинчатые, треугольные и кубические мелкие микритовые кристаллы (1-3 мкм), местами наблюдались округлые, эллипсоидные и розовидные агрегаты и сростки кристаллов (размером до 10 мкм). Полученные криогенные формы кальцита в природных карбонатных кутанах криоаридных почв не встречаются, что может свидетельствовать о том, что в изученных почвах не промораживание, а испарение плёнки с раствором является ведущим механизмом осаждения карбонатных кутан на обломках.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института географии РАН №АААА-А19-119022190169-5 (FMGE-2019-0006).

*Быстряков Г.М., Кулинская Е.В.* Почвы степных криоаридных ландшафтов верховьев Колымы и Индигирки // География и генезис почв Магаданской области. Владивосток: Изд-во АН СССР, 1980. С. 143–160.

*Волковинцер В.И.* Степные криоаридные почвы. Новосибирск: Издательство «Наука», Сибирское отделение, 1978. 208 с.

*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.

## Закономерности почвообразования на плотных породах основного и ультраосновного состава Полярного Урала

*Лесовая С.Н.<sup>1</sup>, Горячкин С.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Институт географии РАН, Москва, Россия  
e-mail: s.lesovaya@spbu.ru*

Ультраосновные и основные породы выделяют совместно в общих схемах закономерностей почвообразования и выветривания [Таргульян, 1971]. И хотя ультраосновные породы редко выходят на дневную поверхность и отсутствуют как самостоятельные единицы в общих схемах, но они представляют интерес для изучения и выявления специфики почвообразования в различных биоклиматических условиях. На Полярном Урале ультраосновными породами сложены наиболее высокие вершины – Пай-Ер и Рай-Из, а в непосредственной близости от них находятся выходы основных пород, что позволяет рассмотреть направленность педогенеза в условиях холодного, гумидного климата в зависимости от химико-минералогических свойств пород и их устойчивости к процессам выветривания.

Объекты исследования расположены на восточном макросклоне Полярного Урала (к западу от поселка Харп Ямало-Ненецкого АО) как на территории массива Рай-Из, где рассматривалось почвообразование на ультраосновных породах, так и за его пределами, где изучены почвы на породах основного состава. На территории массива Рай-Из описаны:

(1) щелочные пелоземы грубогумусированные, потечно-гумусовые [Классификация, 2004]/*Naiplic Regosols (Eutric)* [WRB, 2015], формирующиеся на склонах, в выположенных участках скопления переотложенного суглинистого мелкозема; ключевой участок расположен на высоте 300 м;

(2) суглинистые, щебнистые глееземы грубогумусированные, ожелезненные, потечно-гумусовые мерзлотные/*Turbic Cryosols (Reductaquic)*, развивающиеся на локальных плоских вершинах (высота местности 600-700м), мерзлота находится с глубины 30-40см. Глыбы пород служат водупором, на котором аккумулируется мелкозем яркого зеленовато-сизого цвета – *Gley2 5BG 5/1*. Несмотря на небольшую мощность, значения pH существенно изменяются от нейтральных в поверхностных горизонтах до щелочных в нижних.

Вне массива Рай-Из описаны:

(1) суглинистые, нейтрально-слабощелочные ржавоземы грубогумусированные сильнощебнистые глееватые/*Stagnic Leptosols (Eutric)*, образующиеся на моренном участке. Морена состоит из крупных глыб основных пород и мелкозема ультраосновных. Мерзлота в профиле отсутствует, но ключевой участок характеризуется выраженным криогенным рельефом, расположен на высоте 300 м, как и участок с пелоземами на ультраосновных породах.

(2) суглинистые, кислые, подбуры сильнощебнистые/*Epileptic Entic Podzols*, формирующиеся на гряде основных пород, протянувшейся вдоль реки Сось. Ключевой участок (высота 120 м) находится на плоской вершине хребта с крутым восточным и постепенным западным склонами, накопление мелкозема является результатом локального перераспределения материала основных пород. Это единственный ключевой участок в северной тайге, остальные расположены в горной тундре.

Результаты исследований показали:

1. В условиях холодного гумидного климата ультраосновные породы закономерно проявляют большую неустойчивость к процессам выветривания, что маркируется появлением новых кристаллических фаз уже на уровне формирования мелкозема из плотных пород. Как следствие, на ультраосновных породах реализуется сценарий почвообразования (в том числе и для слаборазвитых почв) из «зрелого» мелкозема, формирование химико-

минералогического состава которого происходит под активным влиянием процессов химического выветривания.

2. Разрушение легко выветривающихся минералов с высоким содержанием магния (оливин).

3. Высокое содержание магния в почвенно-поглощающем комплексе и развитие «магнезиального ощелачивания» со значениями рН в нейтральном - слабощелочном диапазоне, что препятствует развитию «зональных» процессов оподзоливания и альфегумусовой миграции. Как следствие, даже в случае почвообразования на морене, состоящей из основных и ультраосновных пород, примесь ультраосновных материалов препятствует развитию подбуров, которые развиваются только на основных породах.

4. На ультраосновных породах горных тундр в условиях хорошего дренажа, что реализуется на крутых склонах, формируются слабо развитые почвы – пелоземы. В элювиальных позициях на этих породах образуются глееземы с колористичеки ярким проявлением оглеения, специфичность которого проявляется в отсутствии выраженного обезжелезнения мелкозема при наличии яркой зеленовато-сизой окраски.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

XRD данные получены в ресурсном центре СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования». Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 20-04-00888.

*Таргульян В.О.* Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях. М.: Наука, 1971. 268 с.

Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. No. 106. 2015. FAO, Rome.

## Особенности эволюции почв котловин дренированных термокарстовых озёр в разных природных зонах Западной Сибири

*Лойко С.В.*

*Томский государственный университет, Томск, Россия*

*e-mail: s.loyko@yandex.ru*

В пределах криолитозоны Западной Сибири широко распространены термокарстовые озёра, занимающие на некоторых междуречьях до нескольких десятков процентов площади. Эти озёра являются весьма динамичными геосистемами, за счёт постоянных ветров происходит активное термоабразионное и абразионное расширение берегов. Более мелкие озёра объединяются друг с другом в крупные, а также осыхают при перехвате ложбин или в случае углубления базиса эрозии ручьев, что их дренируют. В условиях потепления климата активность дренажа термокарстовых озёр возрастает. Это связано с тем, что на момент весеннего паводка грунты дренирующих понижений оттаивают быстрее. Ещё одной причиной дренажа в условиях наиболее плоских равнин может быть углубление сезонно-талого слоя или формирование таликов в межозёрных перемычках с постепенным стоком воды через образовавшиеся талики. Обычно большинство озёр по мере абразионного расширения их площади испытывают параллельно и частичный дренаж, снижение уровней воды, что сопровождается формированием террас или множества субпараллельных исходному берегу прибойных валов и мочажин между валами. В момент, когда террасы (валы) начинают опоясывать все берега, абразионное расширение котловины прекращается, а озеро продолжает дренироваться в силу естественного снижения базиса эрозии, формируются новые микротеррасы и прибойные валы. Это наиболее распространенный путь эволюции термокарстовых озёр. Он может прерываться катастрофическим дренажным событием, когда озеро спускается полностью, нередко даже за один сезон. Чаше такие катастрофические события бывают на окраинах междуречий, вблизи бровок долин, морских или речных террас. Но даже после катастрофического дренажного события вода редко исчезает из котловины полностью, обычно на дне формируется несколько небольших остаточных водоёмов. Из общения с местными жителями в тундре известны случаи не только естественного осушения термокарстовых озёр, но и мелиоративного их осушения в целях получения угодий с богатым травостоем.

Описанная динамика термокарстовых озёр происходила на протяжении всего голоцена. В силу этого и высокой заозеренности междуречий довольно большие площади плоско-волнистых междуречий криолитозоны Западной Сибири прошли через стадии постакальной эволюции почв. На первом этапе, после освобождения поверхности от воды, формируются растительные сообщества, сильно отличающиеся по видовому составу от фоновых интразональных экосистем. Главной их особенностью является низкое проективное покрытие мхами. Биологическая продуктивность формирующихся сообществ сильно зависит от свойств донных отложений. Наиболее продуктивные травяные экосистемы формируются на иловатых и торфянистых отложениях, а также в случае переслаивания песка и переотложенного торфа. Наиболее низкопродуктивные и с минимальным проективным покрытием сообщества образуются на песчаных отложениях. Также всегда более плодородны донные отложения проточных и крупных озёр по сравнению с озёрами малого размера (до 100–300 м) и озерами верхнего сектора геохимических каскадов.

Драйвером первичной сукцессии экосистем хасыреев является накопление торфа в котловинах, что приводит к отрыву корневых систем от плодородного седимента и внедрению в экосистему сфагнумов, а, следовательно, олиготрофизации и заболачиванию. Наиболее быстро этот процесс происходит в условиях сочетания высокого плодородия донных отложений и отсутствия ежегодного затопления микротеррасы, способного удалить накопившийся растительный опад. Если же микротерраса (или вся котловина) весной продолжает затапливаться, происходит волновой снос прошлогоднего опада, что является

самомелиорацией и препятствует колонизации влажно-луговой экосистемы мхами.

Внедрение сфагнумов начинается после накопления слоя травяного торфа, приводящего к снижению проективного покрытия травостоя. Наиболее быстро этот процесс протекает в типичной тундре, начинаясь уже в первое десятилетие с наиболее сухих и плоских участков. В северной тайге и южной тундре процесс более растянут, начинается также с плоских участков без весеннего затопления, но при условии приповерхностного залегания верховодки. Однако, как в северной тайге, так и в тундре в пределах одной котловины могут сосуществовать экосистемы средних и поздних сукцессионных этапов на протяжении столетия и более. В типичной же тундре зафиксированы случаи полной олиготрофизации котловины за 15–20 лет.

В качестве выводов отметим, что заболачивание – наиболее распространенный тип эволюции хасыреев. Имеются зональные и геоморфологически обусловленные особенности этой эволюции. В условиях формирования озёр вблизи морских побережий, из-за низких абсолютных высот часть хасыреев испытывает влияние приливно-отливных явлений, по сути, превращаясь в лайды, отчего сукцессия останавливается на травяном этапе. В южной тундре формируется наиболее контрастный почвенно-растительный покров, что связано со сложным микрорельефом, вызванным благоприятными условиями для формирования бугров пучения. Появление бугров пучения приводит к тому, что на части бывшего озерного дна формируются отундровелые экосистемы, однако и в них драйвером снижения продуктивности является детритогенез и аградация мерзлоты, провоцирующие выщелачивание. В северной тайге обнаружено активное нарастание хвощево-осоково-моховой сплавины, нетипичное для недренированных озёр, пусковым механизмом этому служит частичный дренаж. Нарастание сплавины способствует вторичному обводнению котловины, благоприятствует прогрессивному заболачиванию, которое через несколько тысячелетий может привести к формированию мерзлотно-выпуклобугристо-топяного комплексного болота на озерных отложениях.

Растительность хасыреев обладает наибольшей продуктивностью на ранних стадиях после дренажа. В последующем естественная сукцессия приводит к падению биологического потенциала в связи с изоляцией богатого субстрата мхами и формированию сфагнового болота.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проекты № 18-77-10045 и 23-17-00281).



## Географо-генетические особенности мерзлотных лесных почв элювиального ряда Центральной Якутии

Чевычелов А.П.

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия

e-mail: chev.soil@list.ru

В работе впервые изучены географические особенности распространения, морфологические характеристики, состав и свойства 2-х типов мерзлотных лесных почв элювиального ряда Центральной Якутии, а именно мерзлотной солоды и мерзлотного подзола иллювиально-гумусово-железистого, сформированных на аллювиальных отложениях II надпойменной террасы р. Лена, в окрестностях г. Якутска (рис. 1).

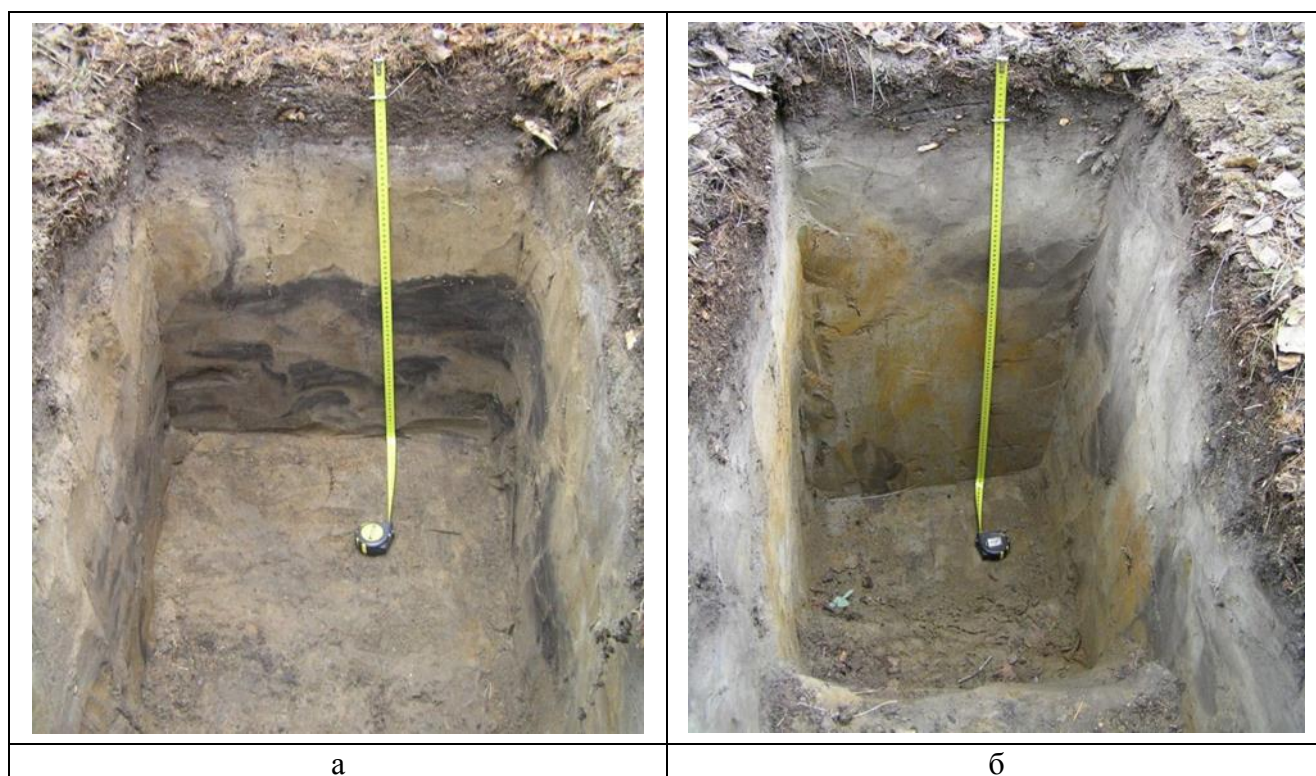


Рис. 1. Профили мерзлотных лесных почв:

а – подзол иллювиально-гумусово-железистый, разрез 2БС-18; б – солодь, разрез 6БС-18.

Климат г. Якутска резко континентальный и засушливый с длительной крайне морозной и малоснежной зимой, коротким относительно жарким и засушливым летом. При этом среднемесячная температура июля составляет 18,7°C, января – (-43,2°C), среднегодовая  $t$  – (-10,3°C), среднегодовое количество осадков – 234 мм, количество осадков за вегетационный период – 158 мм, испаряемость – 502 мм, коэффициент увлажнения – 0,3, коэффициент континентальности – 302 и сумма активных температур – 1565°C [Чевычелов и др., 2009].

Разрез 2БС-18 заложен на мезоповышении, на участке коренного смешанного сосново-березово-лиственничного леса, напочвенный покров – кустарничково-зеленомошный. Географические координаты: широта – 62°01'18,2"N, долгота – 129°37'23,2"E, абсолютная высота – 101,2 м над уровнем моря. Морфологическое строение профиля: O(0-4)–A0(4-12)–A2(12-16/18)–Bf(16/18-34/37)–Bh,f(34/37-48)–BCf(48-75 см).

Разрез 6БС-18 заложен в микропонижении на контуре сосново-березового леса с разреженным напочвенным зеленомошно-кустарничково-разнотравным покровом.

Координаты местозаложения почвенного разреза: 62°01'19,1"N, 129°37'26,0"E, Н–97,2 м. Строение профиля: O(0-4)–A0(4-7)–A1A2(7-12)–A2(12-30/35)–Bt(30/35-76)–Ct,ca(76-100 см).

Необходимо отметить, что данные разрезы подзола и солоды расположены в непосредственной близости друг от друга на расстоянии около 60 м, с разницей по абсолютной высоте (микровышение-микронизжение) в 4 м, а изучаемые почвы формируются на аналогичных элювиальных отложениях в условиях криоаридного климата. Однако состав и свойства данных почв существенно различаются (табл. 1). Для подзола характерна в основном слабокислая реакция среды, элювиально-иллювиальное распределение гумуса, частиц ила и глины, песчано-супесчаный гранулометрический состав. Для солоды отмечаются изменения реакции среды по почвенному профилю: в верхней части реакция в основном слабокислая, в нижней – нейтрально-слабощелочная. Распределение гумуса определяется как аккумулятивное, частиц ила и глины носит резко выраженный элювиально-иллювиальный характер, гранулометрический состав в большей степени определяется как легко- и тяжелосуглинистый.

Горизонт	Глубина, см	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Гумус (ППП), %	Общий N, %	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г почвы			Сумма частиц, %	
					Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	H <sup>+</sup>	<0,001 мм	<0,01 мм
Подзол иллювиально-гумусово-железистый, разрез 2БС-18									
O	0-4	5,7	88,7*	1,11	-	-	-	-	-
A0	4-12	5,1	46,4*	0,86	23,1	10,9	2,8	-	-
A2	12-18	4,7	3,4	0,10	3,8	1,2	2,6	4,8	12,5
Bf	20-30	5,6	0,8	0,07	2,2	1,7	0,2	3,2	5,3
Bh,f	38-48	6,0	1,6	0,06	8,7	1,7	0,7	5,7	19,3
BCf	48-58	6,3	0,3	-	3,5	1,6	0,2	4,0	7,7
Солодь, разрез 6БС-18									
O	0-4	6,2	75,3*	1,59	-	-	-	-	-
A0	4-7	6,2	69,5*	1,01	73,0	31,7	1,1	-	-
A1A2	7-12	5,5	8,5	0,19	11,7	5,8	1,1	7,8	25,6
A2	15-25	5,6	0,8	0,04	4,0	2,0	0,7	8,5	20,1
Bt	40-50	6,8	0,8	0,01	7,0	5,0	-	12,2	29,4
BCt,ca	85-95	8,0	0,7	-	5,2	3,1	-	16,2	43,1

**Табл. 1.** Физико-химические свойства мерзлотных лесных почв Центральной Якутии  
**Примечание.** \*Приведено значение потери при прокаливании, пробел – не определено.

Анализ морфологического строения, свойств и состава исследуемых мерзлотных почв элювиального ряда Центральной Якутии приводит к необходимости констатации того, что подзол иллювиально-гумусово-железистый разреза 2БС-18 и солодь разреза 6БС-18 формируются соответственно под влиянием элементарных почвообразовательных процессов, таких как криогенное оподзоливание и криогенное осолодение [Чевычелов и др., 2022]. А криогенез в мерзлотной области должен рассматриваться, согласно О.В. Макееву, как субфактор почвообразования [Макеев, 2019]. Только в криоаридных условиях Центральной Якутии незначительные изменения влияния факторов-почвообразователей приводят к закономерной смене направления и темпов течения почвообразовательных процессов и к существенным изменениям свойств и состава мерзлотных почв.

Макеев О.В. Криология почв. М.: РАН, 2019. 464 с.

Чевычелов А.П., Скрыбыкина В.П., Васильева Т.И. Географо-генетические особенности формирования свойств и состава мерзлотных почв Центральной Якутии // Почвоведение. 2009. № 6. С. 648-657.

Чевычелов А.П., Горюхов А.Н., Николаева О.А., Коробкова Т.С., Сабарайкина С.М. Почвенно-растительный покров Якутского ботанического сада. Новосибирск: СО РАН, 2022. 164 с.

## Почвы с криометаморфическим горизонтом, описанные на острове Колгуев

*Шматова А.Г.*  
*Институт географии РАН, Москва, Россия*  
*a.shmatova@yandex.ru*

Почвы с криометаморфическим горизонтом ранее были описаны в зонах тайги, лесотундры и южных тундр [Тонконогов, 2010; Русанова и Шахтарова, 2013]. Ниже представлены результаты исследований, проводившихся в зоне наиболее северного предполагаемого ареала распространения почв криометаморфического ряда – на о. Колгуев (зона типичных и южных тундр).

Криометаморфические горизонты диагностировались по наличию выраженной зернистой (2-3 мм) или ооидной (1-1.5 мм) криогенной структуры. Важным критерием также является наличие сепарации гранулометрических фракций, которая, в зависимости от почвообразующих пород, могла выражаться в одном из следующих признаков:

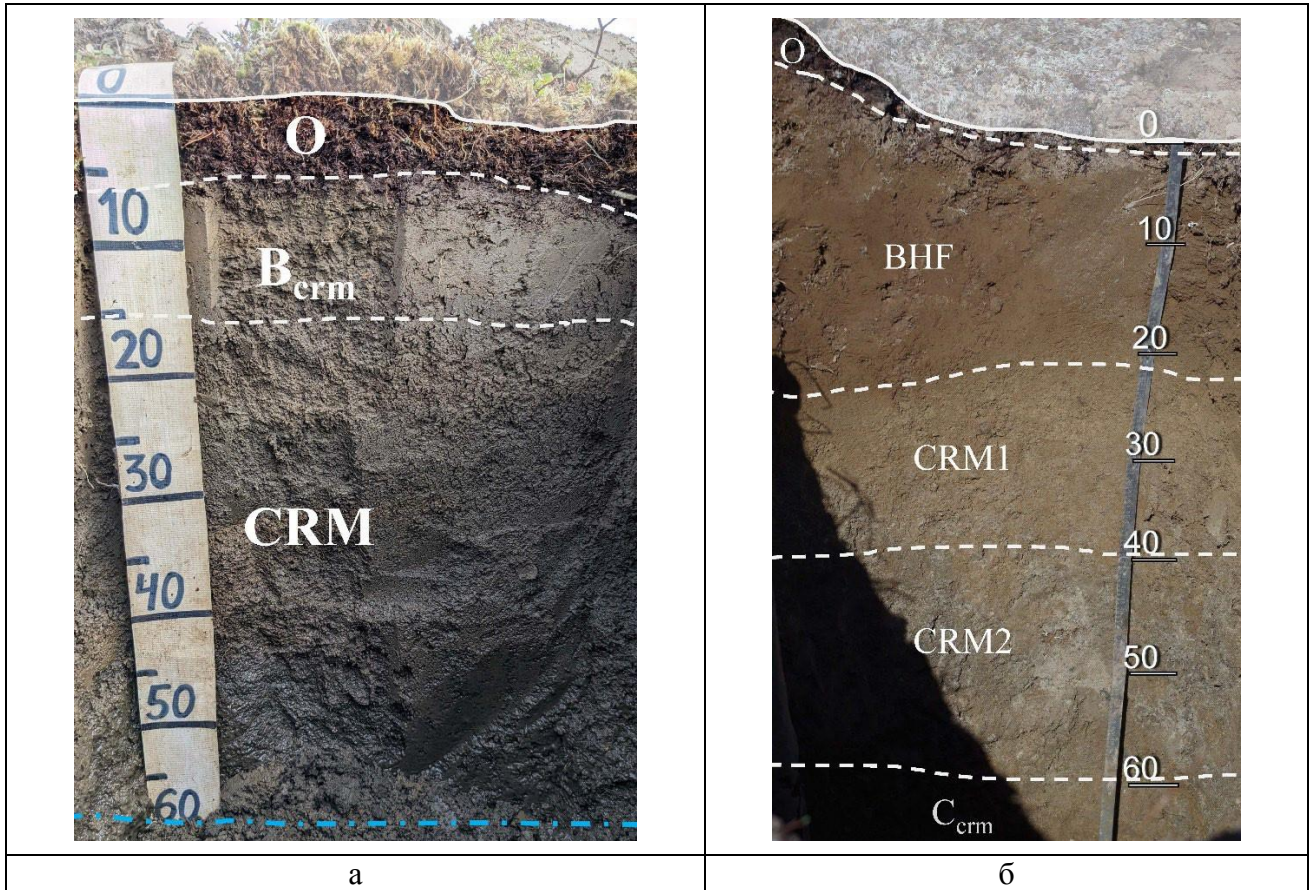
- 1) наличию скелетан;
- 2) появлению липкости при механическом нарушении агрегатов;
- 3) более сухом и уплотненном внутривершинном пространстве. В ряде случаев структура была водопрочной.

Почвы с криометаморфическим горизонтом были описаны во всех обследованных районах острова (центральный, западный и восточный). Криометаморфические почвы разных подтипов доминируют в почвенном покрове возвышенной части острова (более 80 м от уровня моря). Также они преобладают на высоких морских террасах западного района. Всего на Колгуеве были описаны следующие типы почв [Полевой определитель почв, 2008]:

- Криометаморфические (в том числе подтипы: грубогумусированные, глееватые);
- Перегнойно-криометаморфические (в том числе глееватые);
- Глееземы криометаморфические (в том числе перегнойные);
- Криометаморфические грубогумусовые (в составе микроструктур почвенного покрова);
- Подбуры криометаморфические (выделен впервые).

Собственно, криометаморфические почвы (рис. 1а) на Колгуеве формируются на серых суглинисто-глинистых отложениях, предположительно морского генезиса, которые встречаются на всех высотных отметках. Почвы этого типа были описаны более чем в 10 разрезах и во всех из них профиль характеризовался потерей криогенной структуры или ее ослаблением в верхней части. При этом признаков оглеения не наблюдалось, также не было реакции на  $\alpha$ -дипиридил. Подстильно-торфяной горизонт почвы по мощности редко превышает 5 см. Химический анализ образцов из двух почв показал, что реакция среды вниз по профилю увеличивается от 6.0-6.3 (здесь и ниже – рН водный) в верхних минеральных горизонтах до 7.4-7.7 в нижних (глубина оттаивания, предположительно, не сильно превышает 1 м).

Подбуры криометаморфические (рис. 1б) были описаны в трех разрезах на высотах 65-75 м в центральной части острова. Они отличаются наличием в верхней части профиля буро-коричневого горизонта, обогащенного железом, принадлежность которого к альфегумусовым требует подтверждения другими методами. В целом профиль этих почв отличается унаследованным от пород светлым теплым тоном окраски и гранулометрическим составом от тяжелых до легких суглинков. Выраженная криогенная структура характерна для всего профиля. В верхней части с тенденцией к плиткам, а к низу становится крупнее, увеличивается обилие скелетан. Для верхних горизонтов характерна кислая реакция среды (4.5-5.5), а на глубине 60 см она может повышаться до 6.6.



**Рис. 1.** Почвы о. Колгуев с криометаморфическим горизонтом:  
 а) Криометаморфическая на серых тяжелых суглинках; б) Подбур криометаморфический.

Таким образом, почвы с криометаморфическим горизонтом являются основными компонентами почвенного покрова острова Колгуев. Они могут формироваться на породах различного гранулометрического состава (от тяжелых до легких), за исключением песков. В профиле почв криометаморфические горизонты могут сочетаться с глеевым, перегнойным, грубогумусовыми, предположительно, альфегумусовым горизонтом.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Автор благодарит Лобкова В.А. за помощь в проведении полевых исследований, а также всех организаторов и участников экспедиций.

*Полевой определитель почв.* М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

*Русанова Г.В., Шахтарова О.В.* Особенности автоморфного почвообразования в ландшафтах Большеземельской тундры // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2013. №3 (15).

*Тонконогов В.Д.* Автоморфное почвообразование в тундровой и таежной зонах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. М: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. 304 с.

## СЕКЦИЯ 2.

## КРИОГЕННЫЕ ПОЧВЫ И ПОДСТИЛАЮЩАЯ МЕРЗЛОТА В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

### Криогенные почвы в районе городов Салехард и Лабытнанги как компонент лесотундровых мерзлотных экосистем

*Гинзбург А.П.<sup>1</sup>, Паламарчук В.А.<sup>2</sup>, Горбунова А.А.<sup>3</sup>, Безделова А.П.<sup>1</sup>, Исаев В.С.<sup>2</sup>,  
Синицкий А.И.<sup>2</sup>, Тамберг А.С.<sup>3</sup>, Шеин А.Н.<sup>2</sup>, Вануйто В.В.<sup>2</sup>, Васильчук Ю.К.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия

*e-mail: alexandrginzburg13154@yandex.ru*

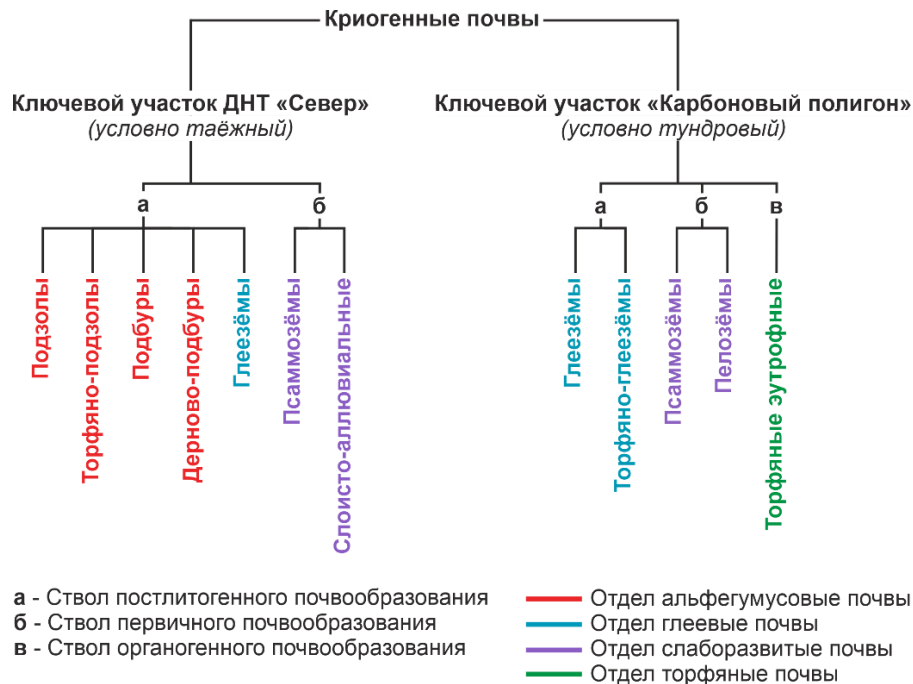
Российскими и зарубежными исследователями проведено значительное количество исследований криогенных процессов в почвах как холодных, так и более южных регионов [Криология почв, 2019; Васильчук, Гинзбург, 2023 а,б]. Изучение почвенного криогенеза актуально для решения ряда фундаментальных и прикладных задач в области генезиса и географии почв, агрохимии, биогеохимии, охраны почвенных ресурсов и окружающей среды и др. Криопедосфера севера Западной Сибири изучена лишь фрагментарно [Хренов, 2011], в результате чего развитие представлений о ней имеет чрезвычайную важность.

Проведены рекогносцировочные исследования на ключевых участках в нижнем течении р. Оби вблизи городов Салехард и Лабытнанги. Специфика природно-территориальных комплексов лесотундры в этом районе обеспечила главное различие условий почвообразования: ключевой участок ДНТ «Север» представляет собой условно северотаёжную экосистему, «Карбоновый полигон» – условно тундровую. Рекогносцировочные исследования включали описание почвенных разрезов по классификации и диагностике почв России [2004], геоботанические описания и картографирование экзогенных геологических процессов, аэрофотосъёмку БПЛА, замеры мощности сезонно-талого слоя (СТС) и построение геоэлектрических разрезов. Литологический состав почвообразующих пород и их температура охарактеризованы по материалам ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики».

На ключевом участке «Карбоновый полигон» почвообразующие породы супесчано-суглинистые, мощность СТС варьирует от 55 до 150 см и более. Температурный режим пород крайне неравномерный: наблюдаются талые породы с температурой около 0-1°C, мерзлые породы развиты локально с глубин 2-5 м и имеют температуру около минус 0,2-0,5°C. В этих условиях под травяными и травяно-кустарничковыми растительными ассоциациями формируются глеевые, слабозрелые и торфяные почвы (рис. 1). Среди основных процессов выделяются оглеение (подтип глееватые), миграция окисленных форм железа к фронтам промерзания (подтип криогенно-ожелезненные) и др.

На ключевом участке ДНТ «Север» почвообразующие породы песчано-супесчаные со средней мощностью СТС более 2 м. Верхние 5 м разреза пород имеют положительные среднегодовые температуры (0,2–2,8°C), ниже залегают мерзлые породы с температурой минус 0,2-0,3°C на 7-13 м. Здесь под листовеннично-еловыми редколесьями с кустарничково-

мохово-лишайниковым покровом в основном развиты почвы отделов альфегумусовые, глеевые и слаборазвитые (рис. 1). Основные процессы в профилях – криогенное растрескивание (подтип языковатые), оглеение (подтип глееватые), оподзоливание (подтип оподзоленные) и др.



**Рис. 1.** Основные выделенные типы почв ключевых участков ДНТ «Север» и «Карбоновый полигон»

Изучено разнообразие криогенных лесотундровых ландшафтов вблизи городов Салехарда и Лабытнанги. На ключевых участках с различными литологическим составом и геотермическими свойствами отложений, а также растительными ассоциациями, наблюдается весьма широкое разнообразие почв и протекают различные процессы, в том числе криогенные. Свойства и режимы исследованных почв в различных ландшафтно-геокриологических условиях могут стать объектами дальнейшего более подробного исследования, в том числе с применением комплекса традиционных методов почвоведения и геокриологических подходов.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (номер проекта РНФ 23-17-00082).

*Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П.* Латеральная и радиальная дифференциация геохимического состава криогенных почв учебно-научного полигона Хановой, Большеземельская тундра // Арктика и Антарктика. 2023а. № 1. С. 88–114. doi: 10.7256/2453-8922.2023.1.40136.

*Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П.* Латеральная и радиальная дифференциация химического состава криогенных почв долины реки Вилюй, Центральная Якутия // Арктика и Антарктика. 2023б. № 1. С. 65–84. doi: 10.7256/2453-8922.2023.1.40034.

*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.

*Криология почв.* М.: РАН, 2019. 464 с.

*Хренов В.Я.* Почвы криолитозоны Западной Сибири: морфология, физико-химические свойства, геохимия. Новосибирск: Наука, 2011. 211 с.

## Распределение микроэлементов в криогенных почвах в условиях антропогенного воздействия

Гололобова А.Г.

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

e-mail: nuta0687@mail.ru

Загрязнение металлами и металлоидами может происходить из материнского материала почвы (литогенный источник) и/или из различных антропогенных источников. Промышленная деятельность считается основным источником поступления тяжелых металлов, которые накапливаются в окружающей среде и достигают токсичных уровней, тем самым неблагоприятно влияя на экосистемы. Например, почвы на промышленных площадках могут иметь отдельные группы элементов-загрязнителей, которые зависят от соответствующих отраслей промышленности, их сырья и продукции [Aloud et al., 2022]. Таким образом, различные виды производственной деятельности в промышленных районах привели к заметному увеличению общего количества токсичных металлов в близлежащих почвах. Положение осложняется слабой устойчивостью северных экосистем к различным формам антропогенной деятельности. Поэтому исследования загрязнения почвы микроэлементами и оценка экологических рисков в условиях криолитозоны обеспечивают научное руководство для раннего предупреждения и защиты региональной почвенной среды, а также снижения последствий, создаваемых тяжелыми металлами почвы для здоровья человека.

Материалами для настоящего исследования послужили мерзлотные почвы, отобранные на территории Далдынского кимберлитового поля, в пределах промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината (УГОК) (N 66°24'52"; E 112°16'39"). В настоящее время Удачинский ГОК ведет разработку двух коренных месторождений алмазов: кимберлитовых трубок «Удачная» и «Зарница». Добыча ведется открытым и закрытым способом.

Почвы Далдыно-Алаakitского района входят в состав Восточно-Сибирской мерзлотно-северотаежной области бореального (умеренно холодного) пояса почв России. Доминирующими типами почв на территории исследования являются криоземы (по WRB Cryosols). Подчиненными типами являются мерзлотные дерново-карбонатные неполноразвитые (по WRB Rendzic Leptosols) и мерзлотные дерново-глеевые почвы (по WRB Umbric Gleysols). Мерзлотные аллювиальные (по WRB Fluvisols) почвы являются интразональным типом.

Опробование почв производилось из ключевых участков (42 точки наблюдения) промышленной площадки УГОК, около карьера кимберлитовых трубок, отвалов, хвостохранилищ, фабрики и других техногенных объектов и т.п. Пробы почвенного материала отбирались из поверхностного слоя почв на глубине 0-20 см, согласно общепринятым методикам. В образцах почв определены подвижные формы Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn и As методом атомно-абсорбционной спектрометрии на МГА-1000 ГК Люмэкс в экстрагенте 1 Н HNO<sub>3</sub>.

Вопросы оценки многоэлементного состава исследуемых почв требуют применения комплексного подхода, что во многом обусловлено спецификой техногенного воздействия, в результате которого может наблюдаться полиэлементное загрязнение почв. В таком случае целесообразным будет применение многомерных статистических методов. Из многих задач многомерного статистического анализа рассмотрены – описательная статистика, факторный (метод главных компонент), кластерный и геостатистический анализы. Статистический анализ проводили с использованием программ Statistica 13.0, SPSS Statistics и OriginPro 2021.

Перед статистическим анализом распределение набора данных оценивали с помощью методов «Box-plot», Колмогорова-Смирнова ( $p < 0,2$ ) и Шапиро-Уилка ( $p < 0,05$ ); если значение распределения не было нормальным, данные преобразовывались в соответствии с принципами анализа композиционных данных (CoDa) с использованием централизованного логарифмического преобразования (clr) – нового подхода, который недавно доказал свою пригодность [Reimann et al., 2012]. Для преобразования необработанных данных в данные clr-преобразования использовалось программное обеспечение CoDaPack.

Средние концентрации микроэлементов располагаются в следующем порядке по убыванию  $Mn > Zn > Ni > Cr > Co > Pb > As > Cd$ . Коэффициенты вариации микроэлементов в верхнем слое почвы Удачинского горно-обогатительного комбината уменьшается в порядке  $Zn > Ni > Mn > Cr > Co > Pb > Cd > As$ . Данные результаты показывают, что распределение As, Cd, Pb, Co, Cr и Mn на территории исследования являются более гомогенными, чем распределение Ni и Zn.

Анализ данных по Колмогорову-Смирнову и Шапиро-Уилка показал, что кроме Mn, концентрации элементов Pb, Ni, Cd, Co, Cr, Zn и As в поверхностном слое почв исследуемой территории отличаются от нормального распределения и указывают на то, что на них могут сильно влиять внешние факторы. Анализ коробчатых диаграмм «Box-plot» показал, что у Cd, Zn и As есть несколько экстремальных выбросов, которые указывают на то, что на естественные концентрации этих металлов сильно влияет внешний источник.

По результатам анализа данных методом главных компонент выявлены три ассоциации элементов с наибольшей степенью нагрузки на поверхностный слой почвы: F1 – Co, Cr, Ni и Zn; F2 – Cd; F3 – As и Mn. Первый компонент представляет собой совокупность естественных и техногенных источников поступления элементов в почвенную среду. Второй в большей степени связан с почвенными параметрами природного происхождения. Третий имеет как природное, так и техногенное происхождение.

В ходе кластерного анализа, установлена связь между группой сидерофильных (Co, Cr, Ni и Mn) и халькофильных (Zn, Cd и As) элементов, которые находят свое отражение в формировании как природных, так и техногенных геохимических аномалий в почвенном покрове.

Геостатистический анализ пространственного распределения микроэлементов позволил определить основные источники и очаги загрязнения. Источником поступления Co, Cr и Ni является участок карьера кимберлитовой трубки «Удачная» и хвостохранилище № 1 обогатительной фабрики, Zn – хвостохранилище № 1, селитебный район г. Удачный, As – полигон высокоминерализованных рассолов «Октябрьский».

Таким образом, многомерный статистический анализ данных позволяет выявить скрытые и неочевидные закономерности содержания и распределения элементов в почве, а также источники и очаги загрязнения, представляющие экологические риски для исследуемой территории.

*Aloud S.S., Alotaibi K.D., Almutairi K.F., Albarakah F.N.* Assessment of Heavy Metals Accumulation in Soil and Native Plants in an Industrial Environment, Saudi Arabia. // Sustainability, 2022, Vol. 14(10), pp. 5993. DOI: 10.3390/su14105993.

*Reimann C., Filzmoser P., Fabian K., Hron K., Birke M., Demetriades A., Dinelli E., Ladenberger A.* The concept of compositional data analysis in practice – Total major element concentrations in agricultural and grazing land soils of Europe. // Science of The Total Environment, 2012, Vol. 426, pp. 196-210. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.02.032.



## Преобразования почв и почвенного покрова западной части Центрально-Якутской равнины в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки

*Данилов П.П., Саввинов Г.Н., Степанов К.А.*

*Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера*

*им. проф. Д. Д. Саввинова СВФУ, Якутск, Россия*

*e-mail: DanPP@mail.ru*

Первыми исследователями почв Якутии было отмечено своеобразие почвенного покрова Центрально-Якутской равнины [Красюк, 1927; Аболин, 1929 и др.]. В дальнейшем, с началом промышленного освоения Западной Якутии большое внимание было уделено почвенным исследованиям бассейна р. Вилюй – западной части Центрально-Якутской равнины [Зольников и др., 1962; Еловская и др., 1978; Саввинов и др., 1981 и др.]. Исследования в основном были посвящены вопросам генезиса и географии мерзлотных почв, а также практического использования почвенных ресурсов в сельскохозяйственном производстве и промышленности. Равнина расположена в пределах Вилюйской синеклизы на песках и песчаниках мезозоя. Распределение почвенных ареалов на участке исследования в различных геоморфологических уровнях правобережья нижнего течения р. Вилюй примерно выглядит следующим образом (рис. 1). Типы и порядки почв даны согласно региональной классификации мерзлотных почв Якутии [Еловская, 1987].



**Рис. 1.** Структура почвенного покрова правобережья нижнего течения р. Вилюй (Данилов и др., 2014).

Почвенный покров в данном районе в условиях постоянной антропогенной нагрузки и в результате изменений некоторых показателей современного климата подвергается преобразованию за счет увеличения мощности сезонно-талого слоя и деградации верхней границы многолетнемерзлых пород. Последнее, несомненно, связано с угнетением и последующей сукцессией растительных сообществ, и, соответственно, снижением биопродуктивности растительности (травостоя от 2 до 4 раз), при котором изменяется гидротермический режим почв. Как известно, эти преобразования почвенно-растительного покрова создают высокий класс пожароопасности в районе. По официальным данным, за последние пять лет пирогенному преобразованию подверглись около 30% от общей площади исследуемой территории.

Практически во всех изученных антропогенно-преобразованных пунктах в палевых и аласных почвах наблюдается слабая степень засоления хлоридного типа, которое с глубиной постепенно убывает. Для аласных почв характерно большое содержание органического вещества, преобладание суглинистого гранулометрического состава, которые обладают более высокой сорбционной способностью. Реакция среды верхних гумусовых горизонтов варьирует в пределах 7,8-8,1. В таких условиях происходит аккумуляция Pb, Zn, Mn, Co и Ni. Далее вниз по почвенному профилю условия среды изменяются в сторону щелочности, и pH колеблется в пределах 8,1 – 8,7. Поэтому почвы замкнутых аласных экосистем характеризуются относительно высокими коэффициентами концентрации. Площадное распространение микроэлементов, показывающее общий уровень загрязнения почвенного покрова, колеблется в пределах 1,46 – 15,91 и относится к допустимой категории загрязнения, но она близка к категории умеренно опасной, где содержание химических веществ в почве превышает ПДК при лимитирующем общесанитарном и миграционном водном показателе вредности, но ниже ПДК по транслокационному показателю.

Таким образом, засоление и изменение pH среды в щелочную сторону приводит к аккумуляции определенных элементов в почвенном материале, что может привести к большей деградации аласных почв и в целом замкнутых экосистем района исследований. Это в основном наблюдается близ селитебных зон, заброшенных или функционирующих сельскохозяйственных комплексов.

*Аболин Р.И.* Геоботаническое и почвенное описание Лено-Виллойской равнины. Л.: Изд-во АН СССР, 1929. 378 с. (Тр. Комиссии по изучению ЯАССР. – Т. 10).

*Данилов П.П., Саввинов Г.Н., Боескоров В.С.* К вопросу о формировании аккумулятивно-гумусовых остаточно-карбонатных почв в Центрально-якутской равнине (нижнее течение р. Виллой). Почвы Дальнего Востока России: генезис, география, картография, плодородие, рациональное использование и экологическое состояние (к 90-летию Г.И. Иванова): Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием. – Владивосток, 2014. С. 60-63.

*Еловская Л.Г.* Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии // АН СССР. Сиб. Отд. Якут. филиал СО АН СССР, 1987. 172 с.

*Зольников В.Г., Еловская Л.Г., Тетерина Л.В., Черняк Е.И.* Почвы Виллойского бассейна и их использование. М.: изд-во АН СССР, 1962. 204 с.

*Саввинов Д.Д., Семенова Т.Н., Романов В.И.* Агрофизическая характеристика почв Виллойского бассейна. Якутск, 1981. 77 с.

## Влияние глобальных изменений климата на почвенный покров криолитозоны с ледовым комплексом

*Десяткин Р.В.*

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия*

*e-mail: rvdes@ibpc.ysn.ru*

На территории Якутии огромные площади средней тайги, северотаежных редколесий и тундры занимают грунты с ледовым комплексом, которые при нарушении термического режима начинают деградировать, приводя к термокарстовой трансформации почвенного и растительного покрова. К наиболее уязвимым мерзлотным ландшафтам на равнинных территориях Центральной Якутии относится межгаласный тип местности средневысотных террас бассейна среднего течения р. Лена. Такой же тип местности широко развит в бассейнах нижнего и среднего течения рек Яна, Индигирка и Колыма. На огромных площадях указанных территорий межгаласный тип местности сложен сильнольдистыми грунтами озерно-аллювиального происхождения (ледовый комплекс или едома) с объемной льдистостью 0,6-0,8.

Потепление климата 2010-2022 гг. в северо-таежной и тундровой зонах северо-востока Якутии по всем параметрам намного превзошло потепление Арктики в 1930-1940-х годах. Средняя годовая температура воздуха в это время была на 1,5-2°С выше среднего многолетнего значения, тогда как в 1930-1940 гг. она была выше только на 0,5-1°С [Fedorov et al, 2022]. На территории Центральной Якутии в последние десятилетия также отчетливо проявляется потепление климата. Скорость роста среднегодовой температуры воздуха (до 0,08°С/год) – одна из самых высоких в России. В 1960–1970-е гг. потепление было не столь заметным; оно ускорила в 1980-х годах (Скачков, 2005). Последние десятилетия со среднегодовой температурой воздуха -7,5/-8,7°С были самыми теплыми в истории метеорологических наблюдений в Центральной Якутии (Григорьев и др., 2010).

Потепление климата вызывает деградацию ледового комплекса с образованием начальных форм термокарста – байджемахов и былларов, или остаточных бугров, окруженных ложбинами над полигональной сетью тающих жил льдов.

На межгаласных ландшафтах Центральной Якутии с мощными жилами льда на глубине 2-4 м интенсивное оттаивание вечной мерзлоты на незащищенных лесной растительностью территориях трансформирует микрорельеф поверхности с образованием былларов, где формируются бугры диаметром 6–10 м, окруженных полигональной сетью ложбин глубиной 0,3–1,5 м над тающими жилами льда. Этот процесс происходит на бывших пахотных землях, заброшенных в последние 40 лет, на горячих и обширных участках, уничтоженных сибирским шелкопрядом в начале XX столетия. Деградация рельефа сопровождается трансформацией ранее однородного почвенного покрова, сложенного камбикотурбикриозолями (содик, мерзлотная палевая) в дифференцированные комплексы мерзлотно-кальциевых солонцов (турбик) на буграх и известково-стагниковых солонцов (турбик) в микронизинах. Верхний слой почвы на насыпях имеет сильнощелочную реакцию (рН 8,5-9,5) и низкое (<2%) содержание органического углерода; волнистая линия вскипания на глубине 15-30 см. Почвы микропонижен имеют в верхних горизонтах реакцию, близкую к нейтральной (рН 6,2-7,5); более высокое содержание органического углерода (2-3%); более выраженная текстурная дифференциация профиля с формированием типичных горизонтов patricB<sub>tn</sub> и, в некоторых случаях, перекрывающих их горизонтов albic (E); более глубокая (50-60 см) линия вскипания; четкие застойные явления в нижней части профиля. При неглубоком залегании жильных льдов самая нижняя часть грунта в микропонижении характеризуется низкой объемной плотностью (1,04 г/см<sup>3</sup>) из-за появления ложбин после оттаивания льдистого переходного слоя и таяния вершин ледяных жил. Это свидетельствует об усилении проседания почв в будущем и появлении зачатков первичных термокарстовых озер (дюэдя – первичное термокарстовое озеро пролог аласного ландшафта). Быстрое

термокарстовое развитие микрорельефа с последующей дифференциацией почвенного покрова с повышением солонцеватости почв на микроповышениях и текстурной дифференциацией с переувлажнением нижних слоев в микропонижениях исключает восстановление первичного почвенного покрова [Desyatkin et al, 2021].

После крупных пожаров в 1999-2001 годах на обширных площадях гарей северной тайги в бассейне среднего течения р. Яны сформировался бугристо-западинный микрорельеф (быллары), где бугры остаточного рельефа диаметром до 40 м окружены полигональной сетью ложбин глубиной 0,3-1,5 м над тающими жилами льда. Процесс сопровождается трансформацией ранее однородного почвенного покрова под разнотравными лиственничными лесами из *Larix cajanderi* Mayr. сложенного мерзлотной палевой иллювиально-ожелезненной глееватой почвой (Reductaquic Calcic Cambic Cryosol (Loamic, Siltic) [Desyatkin et al, 2022]. При появлении западинно-бугристого микрорельефа почвенный покров приобретает комплексную структуру. Дифференцированные таянием льдов почвенные комплексы включают мерзлотные палевые типичные почвы (Calcic Cambic Cryosol (Loamic) со слабыми признаками накопления материала albic под органогенным горизонтом на вершине былларов под послепожарным молодым мохово-брусничным лиственничником и мерзлотные палевые типичные почвы Histic Calcic Cambic Cryosol (Loamic, Siltic) в западинах под кочковатыми вейниково-осоковыми ассоциациями.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 19-29-05151) и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0026, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21- 121012190036-6).

*Desyatkin R., N.Filippov, A.Desyatkin, D.Konyushkov, S. Goryachkin.* Degradation of Arable Soils in Central Yakutia: Negative Consequences of Global Warming for Yedomal Landscapes // *Front. Earth Sci.*, 24 September 2021. Pp. 1-13. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.683730>.

*Desyatkin, R.; Okonshnikova, M.; Ivanova, A.; Nikolaeva, M.; Filippov, N.; Desyatkin, A.* Dynamics of Vegetation and Soil Cover of Pyrogenically Disturbed Areas of the Northern Taiga under Conditions of Thermokarst Development and Climate Warming. *Land* 2022, 11, 1594. <https://doi.org/10.3390/land11091594>.

*Fedorov, A.N.; Konstantinov, P.Y.; Vasiliev, N.F.; Basharin, N.I.; Shepelev, A.G.; Andreeva, V.A.; Semenov, V.P.; Torgovkin, Y.I.; Desyatkin, A.R.; Zheleznyak, M.N.* Ice Volumes in Permafrost Landscapes of Arctic Yakutia. *Land*, 2022, 11, 2329. <https://doi.org/10.3390/land11122329>.

*Григорьев М.Н., Ю.Б. Скачков, А.Н. Федоров, Р.В. Десяткин, Т.Х. Максимов.* Обзор современных изменений климата и природной среды в Республике Саха (Якутия) / Якутск: ИМЗ СО РАН, 2010. 17 с.

*Скачков Ю.Б.* Тенденции современных изменений температуры воздуха по Республике Саха (Якутия) // Вопросы географии Якутии. Вып.9: Исследования ландшафтов криогенных областей. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2005. С. 27-31.

## Состояние основных типов почв Мирнинского района Республики Саха (Якутия) в условиях изменения климата

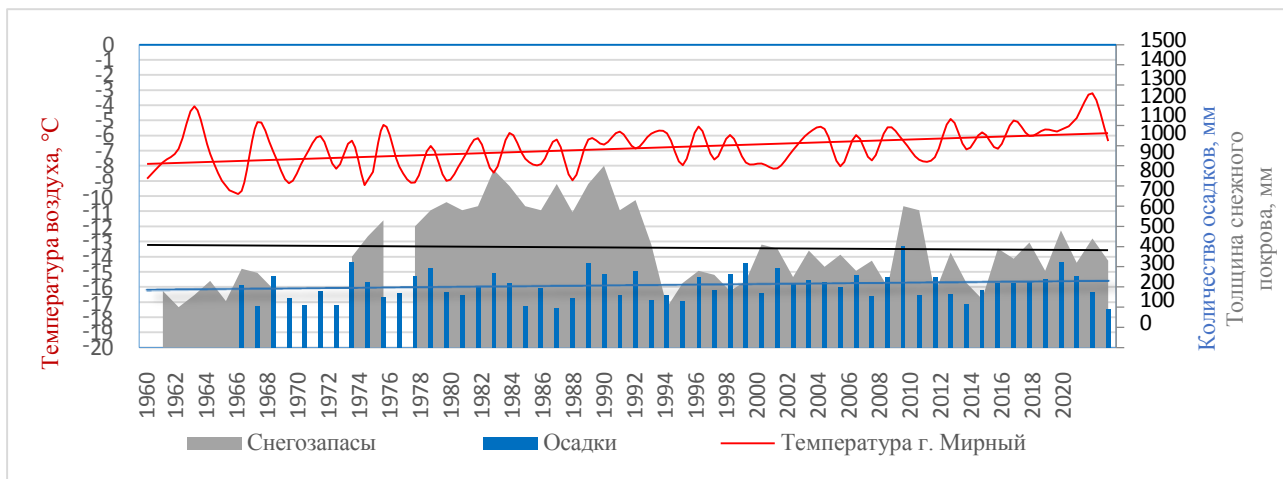
*Егоров Х.В., Саввинов Г.Н., Данилов П.П.*

*Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия*

*e-mail: x.egorov@inbox.ru*

По почвенно-географическому районированию Якутии южная часть территории Мирнинского района РС (Я) относится к Западно-Вилуйскому почвенному району Якутской Восточно-Сибирской таежно-мелкодолинной почвенной провинции с преобладанием дерново-карбонатных тяжелосуглинистых, торфянисто- и торфяно- глеевых болотных почв, а северная часть – к Оленеко-Мархинскому почвенному району с доминированием таежных деструктивных остаточного-карбонатных, перегнойно-карбонатных, таежных глеевых торфянисто-перегнойных суглинистых почв Вилуйско-Оленекской почвенной провинции [Зольников и др., 1962]. В настоящее время, почвенный покров указанных почвенных районов существенно преобразован с образованием техногенных поверхностных образований и антропогенно-преобразованных почв [Данилов и др., 2017].

Особенностью климата Западной Якутии является его резкая континентальность, проявляющаяся в больших годовых колебаниях температуры воздуха и относительно малом количестве выпадающих осадков. С целью выявления тенденций климатических изменений были построены климатограммы по данным метеостанций в г. Мирный (рис. 1) и с. Сунтар (рис. 2).



**Рис. 1.** Климатограмма по данным п. г. Мирный 1960-2021 гг.

Данные климатограммы (рис 1, 2) показывают довольно схожие тенденции. Линии тренда среднегодовой температуры и осадков в г. Мирный и с. Сунтар демонстрируют увеличение среднегодовой температуры и количества осадков за последние 60 лет.

Параметры почвенно-грунтового климата криолитозоны далеко не всегда соответствуют параметрам атмосферного климата. Почвенно-грунтовой климат определяется ландшафтными условиями, в которых атмосферный климат выступает как один из его компонентов. Важным фактором, определяющим степень устойчивости мерзлотных почв к деградации, является наличие льда в почвенно-грунтовой толще: его количество, качество, характер залегания.

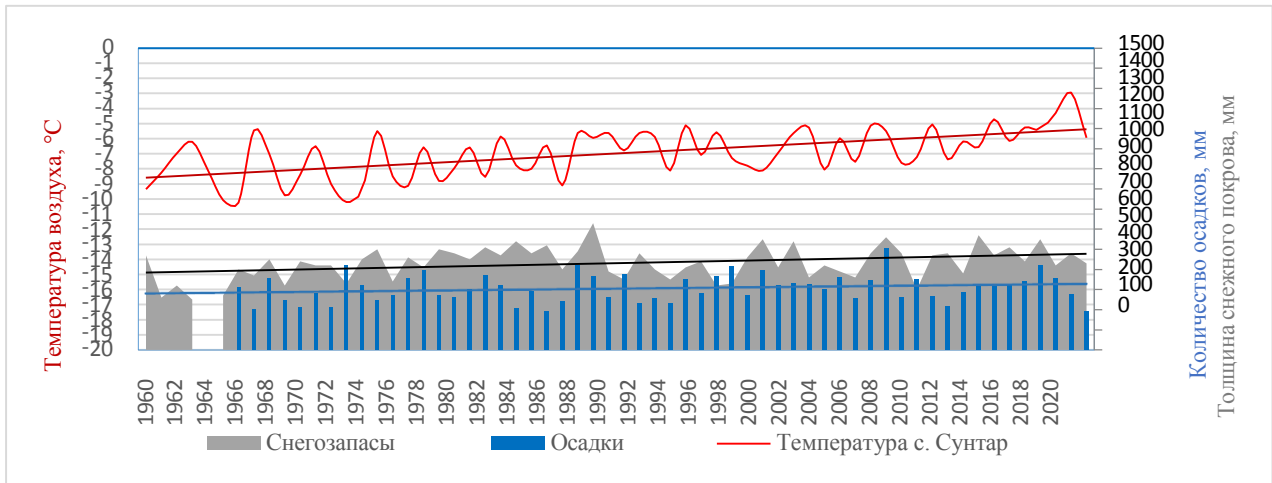


Рис. 2. Климатограмма по данным п. с. Сунтар 1960-2021 гг.

Высокая льдистость почв и грунтов, наличие различных форм льда при механических нарушениях поверхности и изменении теплового режима способствуют более активному проявлению таких процессов, как термокарст, солифлюкция (сползание грунта по склонам), пучение [Баранов, 2010].



Рис. 3. Среднегодовая температура почвы в с. Сунтар 1964-2008 гг.

На основании динамики среднегодовых температур почвы с. Сунтар в период с середины 1980-х гг. до 1992 г. прослеживалась тенденция к повышению среднегодовой температуры почвы с мерзлотным типом температурного режима до положительных значений.

Выявленные климатические тенденции, демонстрирующие стабильное повышение среднегодовой температуры воздуха и количества осадков, могут приводить к изменению почвенного климата и состояния основных типов почв исследуемых районов.

Баранов А.В., Григорьев В.Я., Якушев Н.Л., Унанян К.Л. Деградация и охрана почв в районах освоения месторождений углеводородов Крайнего Севера // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2010. №2. С. 6.  
 Данилов П.П., Саввинов Г.Н., Петров А.А., Боевский В.С. Природно-антропогенные изменения почвенного покрова Мирнинского горнопромышленного района // Горный журнал. 2017. №3. С. 75-80.  
 Зольников В.Г., Еловская Л.Г., Тетерина Л.В., Черняк Е.И. Почвы Вилюйского бассейна и их использование. М.: изд-во АН СССР, 1962. – 204 с.

## Влияние микрорельефа на температурный режим почв заболоченных ландшафтов юга криолитозоны Западной Сибири

*Истигечев Г.И., Лойко С.В., Раудина Т.В., Кулижский С.П.  
Томский государственный университет, Томск, Россия  
e-mail: istigechev.g@yandex.ru*

Север Западной Сибири характеризуется наличием крупнейших болотных массивов, которые в сумме составляют более 70% площади болот России. В них аккумулированы запасы углерода в глобальных масштабах – более 100 млрд т [Инишева Л.И. и др., 2012]. Переувлажненные ландшафты отличаются специфическим микрорельефом, на который влияет степень увлажнения, тип растительности, мощность торфяной толщи, наличие многолетней мерзлоты и т.д. Торф оказывает огромное влияние не только на рельеф, но и на температурный режим. Прослойка неразложившихся остатков растительности играет роль отличного температурного изолятора и способна не только укрывать остатки мерзлых грунтов последнего оледенения от протаивания летом, но и аккумулировать холод в зимний период. Болотные ландшафты являются довольно динамичными структурами, однако максимально изменчивы болота юга криолитозоны, так называемой области «теплой мерзлоты». Эта территория наиболее восприимчива к изменению климата. На мерзлых болотах наблюдаются сложные связи между изменчивостью параметров почв и такими параметрами, как гидрология, микрорельеф, топология верхней границы многолетнемерзлых пород, что за собой ведет изменение потоков влаги, а, соответственно, и перераспределение тепла и питательных веществ. Вся картина усложняется особенностью торфа менять свою мощность и форму поверхности в зависимости от уровня грунтовых вод, создавая условия для возникновения новых почвенных микрокомбинаций [Jelmer J. Nijp et al., 2018].

Для изучения болот юга криолитозоны был выбран участок территории ханымейского плоскоместья, расположенного на междуречье Пякупура и Чучуяхи. Здесь на дне крупного древнего высохшего озера, на чрезвычайно плоской поверхности формируются плоскобугристые мерзлые болота. Эта местность изобилует большим количеством термокарстовых озер, площадь которых доходит до 50% от площади всей территории, а также хасыреями – спущенными термокарстовыми озерами. На периферии дна древнего спущенного водоема за береговым валом присутствуют крупнобугристые болота.

Анализ космических снимков, соотношения старых и молодых хасыреев, а также радиоуглеродных дат показал, что активность дренажа термокарстовых озер увеличилась за последние 100 лет в 10 раз в сравнении с предыдущими двумя тысячами лет. Это свидетельствует о более активном протаивании мерзлых пород. В связи с этим увеличивается внутрпочвенный сток, с которым идет распределение тепла, что, в свою очередь, вносит свой вклад в разнообразие температурных режимов изучаемой территории. Для сравнения температурных профилей основных типов ландшафтов были установлены автоматические станции мониторинга температуры почвенного профиля. Измерительные приборы представляют собой щупы длиной от 80 до 160 см с расположенными через каждые 10 см датчиками температуры. В итоге температурные профили были получены на плоскобугристом болоте в парах мерзлый плоский бугор и слабопроточная топь, песчаный талый бугор и проточная топь, приозерная сфагновая мочажина, на хасырее – в паре березняк на береговом валу вторичного водоема и пушицево-осоковая топь, на плоскобугристом болоте – в паре на бугре и в сфагновой мочажине.

Наиболее холодные профили ожидаемо были в почвах торфяных бугров, как плоскобугристого болота, так и крупнобугристого. Их промерзание и оттаивание происходит с одинаковыми скоростями, деятельный слой также достигает в среднем 60 см глубины. Глубина фронта промерзания в зимний период – более 1 метра, сама же многолетняя мерзлота не достигает температуры  $-1^{\circ}\text{C}$ . Песчаный бугор на плоскобугристом болоте, в геоморфологическом и в ботаническом плане, который выглядит идентично мерзлоту

торфяному бугру имеет резкие различия в температурном режиме. В летнее время почва песчаного бугра прогревается на глубине 1 метра до 7°C, а зимой промерзает на всю метровую глубину измерений. Другая интересная картина наблюдалась в топях плоскобугристого болота, где при наличии схожих торфяных мезотрофных почвах наблюдаются совершенно разные скорости весеннего оттаивания профиля. В топи в ложбине у песчаного бугра почва оттаивает за считанные дни ввиду сброса талых вод из одного озера в другое. В завершение стоит отметить разницу в сфагновых мочажинах плоскобугристого и крупнобугристого болот. В летний период разница в прогревании мочажин незначительна, однако зимой мочажина на плоскобугристом болоте промерзает до 80 см, что в два раза глубже, чем на крупнобугристом болоте. Это связано с разницей в мощности снега так же приблизительно в 2 раза.

Сильнейшая заозеренность Ханымейского плоскоместья способствует сильному отеплению интразональных топяных почв, что принимают воду, вытекающую из озёр (топи, ложбины, поймы). В случае отсутствия озёр термические режимы топяных почв были бы менее благоприятными, следовательно, площадь мерзлотных почв составляла бы не 10-15%, а намного больше. Наиболее контрастные термические условия складываются на плоскобугристом болоте в условиях примерно равной мощности торфа на бугре и в ложбине. Ухудшению термических режимов способствует наличие торфяной залежи, сброс воды по микрорельефу (выпуклость), поселение лишайников. В условиях топей летние температуры снижает покров сфагновых мхов. Температурные режимы почв плоскобугристых болот и динамика оттаивания двух соседних форм микрорельефа с близкой растительностью могут различаться так, будто они отстоят друг от друга на несколько природных зон. Главная роль в этих отличиях отводится гидрологическому фактору и накоплению зимой снега на поверхности. Вода в условиях мерзлых болот является главным фактором перераспределения теплового ресурса внутри болотного массива. В случае продолжения потепления климата углубление верхней границы многолетнемерзлого слоя будет протекать с очень неодинаковыми скоростями, с максимальными величинами по краям мерзлотных «куполов», с уменьшением к их центральным частям.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проектов № 23-17-00281 и № 21-77-00021.

*Инишева Л.И., Сергеева М.А., Смирнов О.Н.* Депонирование и эмиссия углерода болотами Западной Сибири // Научный диалог. 2012. №. 7. С. 61-74.

*Nijp J.J. Metselaar, K., Limpens, J., Bartholomeus, H.M., Nilsson, M.B., Berendse, F., van der Zee, S.E.* High resolution peat volume change in a northern peatland: Spatial variability, main drivers, and impact on ecohydrology // Ecohydrology. 2019. Т. 12. №. 6. С. e2114. DOI: 10.1002/eco.2114.



## Изменчивость температуры почвы Западной Сибири в условиях современного климата

*Китаев Л.М., Туткова Т.Б.*  
*Институт географии РАН, Москва, Россия*  
*e-mail: lkitaev@mail.ru*

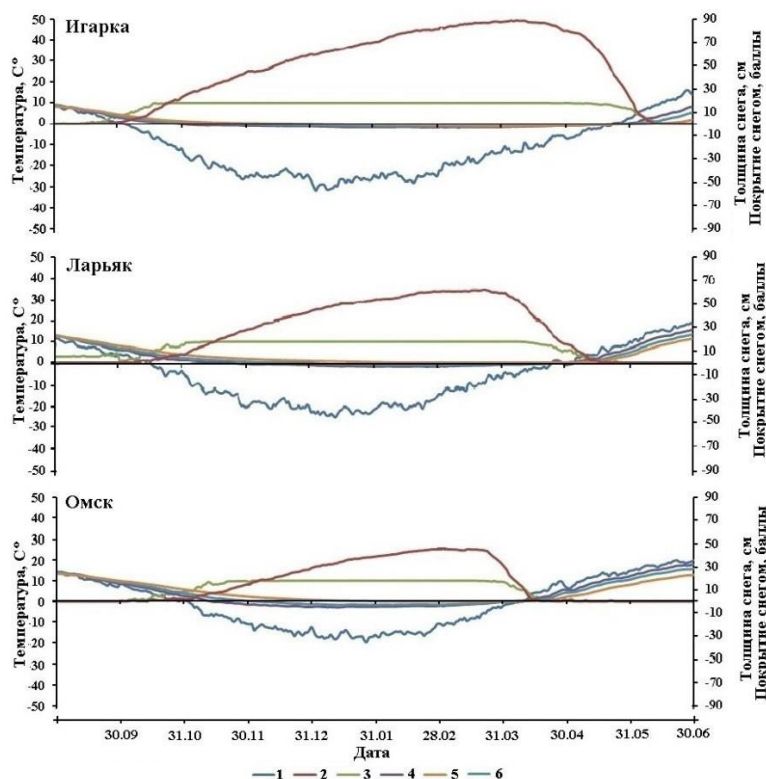
Региональные различия теплового режима почвы связаны с притоком атмосферного тепла и особенностями воднофизических свойств при существенном влиянии на растительный покров и водообменные процессы; сведения о температуре почвы учитываются при решении многих прикладных задач в ходе хозяйственного использования территории. Реакция температуры почвы на изменчивость метеорологической обстановки не всегда однозначна, особенно при сезонных различиях на севере Евразии. В связи с этим исследована региональная сезонная и многолетняя неоднородность изменчивости температурного режима почвы в условиях современного климата Западной Сибири. В качестве исходной информации используются материалы наблюдений метеорологических станций за период 1988-2017 гг. – суточные данные наблюдений температуры почвы на глубинах 20, 40, 80 см, температуры воздуха, толщины снежного покрова.

Как было выявлено ранее [Китаев, 2021], в условиях Европейской части России после установления устойчивого снежного покрова наблюдается существенное снижение (по сравнению с бесснежными осенним и весенним периодами) вариабельности температур почвы: температура колеблется в узком диапазоне околонулевых значений при малых величинах стандартного отклонения. Это результат проявления теплозащитных свойств снежного покрова. Подобная сезонная изменчивость прослеживаются и в Западной Сибири: при формировании здесь снежного покрова значительной мощности (39-71 см) диапазон изменений температур почвы в течение зимы остается небольшим, незначительно снижаясь до 1.5 до -2.7°C соответственно снижению региональной температуры воздуха (рис. 1). Региональные значения стандартного отклонения многолетних рядов летних температур почвы (июль-август) превышают значения стандартного отклонения хода зимних температур (январь-февраль) аналогично соотношению Восточно-Европейской равнины. Это происходит в связи с достаточной для теплозащитных свойств толщиной снега (табл. 1, рис.1). В некоторой степени, с теплоизолирующими свойствами снега, по-видимому, также связаны значительные различия зимних температур воздуха и почвы, в 4-5 раз превышающие различия температур в летний период.

Пункт	Характеристики для глубин 20 / 40 / 80 см за январь-февраль и июнь-июль-август		
	Среднее, мм	Стандартное отклонение, мм	Коэффициенты линейного тренда, мм / 10 лет
Игарка	-1.2 / -1.3 / -0.4 9.9 / 9.7 / 7.3	0.48 / 0.52 / 0.23 1.31 / 2.11 / 1.65	<i>0.100 / 0.029 / 0.523</i> <i>-0.659 / 1.079 / 0.513</i>
Ларьяк	-1.3 / -0.9 / 0.5 15.9 / 14.8 / 13.7	0.82 / 0.48 / 0.29 1.00 / 0.94 / 0.77	<i>-0.205 / 0.186 / 0.560</i> <i>-0.599 / -0.388 / -0.550</i>
Омск	-3.4 / -3.4 / -0.6 16.9 / 15.5 / 13.5	0.81 / 0.73 / 0.64 1.72 / 1.74 / 0.94	<i>-0.063 / -0.012 / -0.251</i> <i>-0.170 / 0.086 / 0.274</i>

**Табл. 1.** Многолетняя региональная изменчивость температуры почвы.

**Примечание:** Курсивом выделены незначимые на уровне 95% коэффициенты корреляции.



**Рис. 1.** Изменчивость температур почвы на фоне изменений характеристик метеорологического режима (по данным метеорологических станций): 1 – температура воздуха, °С; 2 – толщина снега, см; 3 – степень покрытия территории снегом, баллы; 4, 5, 6 – температура почвы на глубинах 20, 40 и 80 см, °С.

Значимая регрессионная зависимость многолетнего хода зимних температур почвы отсутствует для температуры воздуха и зависит от мощности снежного покрова – как для наиболее снежного в Сибири региона (коэффициенты регрессии 0.509-0.539, бета коэффициенты 0.018-0.074 для мощности снежного покрова и незначимые бета коэффициенты для температуры воздуха), летом значимые коэффициенты корреляции хода температур воздуха и почвы характерны для горизонтов 40-80 см (0.625-0.766). В условиях потепления значимые положительные коэффициенты линейных трендов температур воздуха как самых холодных, так и самых теплых месяцев года (январь- февраль и июнь-август) отсутствуют; для температуры почвы значимые, но разнонаправленные тренды отмечены только в летний период (табл. 1).

В настоящее время аналогичных обобщений по соотношению изменчивости метеорологического режима и температуры почвы для крупных регионов севера Евразии нами не обнаружено; выявленные закономерности могут быть использованы в анализе результатов мониторинга состояния поверхности суши, в разработке алгоритмов дистанционного зондирования, при уточнении прогнозных сценариев изменений окружающей среды.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований Государственных академий наук, тема FMGE-2019-0009.

*Кутаев Л.М.* Сопряженность изменений температуры воздуха, толщины снежного покрова и температуры почвы Восточно-Европейской равнины // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 3. С. 43-49.

## Влияние пятен-медальонов на рельеф полигональных торфяников

*Королева Е.С.<sup>1</sup>, Слагода Е.А.<sup>2,3</sup>, Хомутов А.В.<sup>2,3</sup>*

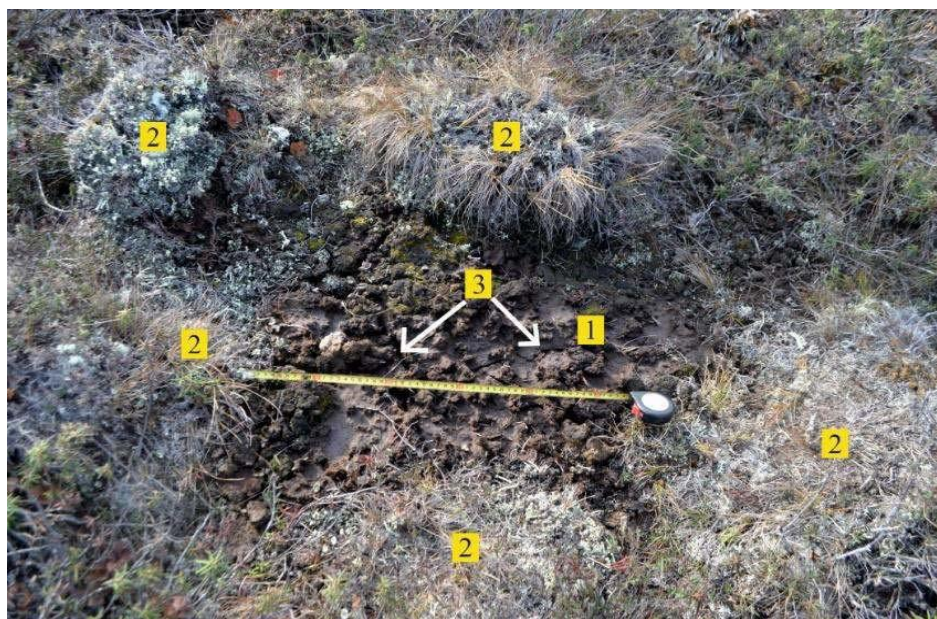
<sup>1</sup>Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

<sup>2</sup>Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия

<sup>3</sup>Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

*e-mail: koroleva\_katy@inbox.ru*

На III озерно-аллювиальной равнине Пур-Тазовского междуречья широко распространены не только минеральные, но и торфяные пятна-медальоны, приуроченные, в основном, к мощным торфяникам в хасырях. Торфяные пятна-медальоны распространены на выпуклых, плоских, вогнутых полигонах с валиками, редко на плоских межполигональных понижениях и в широких заросших колеях вездеходов. Они обрамлены кочками и бугорками с растительностью, формируясь в понижениях поверхности (рис. 1). Как показали исследования, торфяные пятна-медальоны формируются в летний период. В работе предложена феноменологическая модель их развития, которая предполагает следующую последовательность событий: увеличение мощности сезонноталого слоя; пучение, просадки с образованием криотурбаций; накопление газа в обводненном торфе в замкнутой полости между кровлей мерзлых пород и плотным талым торфом; при достижении критического давления – разрыв плотного торфа и излияние водно-газоторфонасыщенной смеси на поверхность. Ведущим процессом образования пятен-медальонов в торфяниках является оттаивание переходного и промежуточного слоев в верхней части разреза мерзлых грунтов [Королева Е.С., 2022].



**Рис.1.** Органическое пятно-медальон.

Условные обозначения: 1 – органическое пятно-медальон, 2 – кочки, 3 – трещины усыхания

Формирование торфяных пятен-медальонов способствует развитию микрорельефа полигональных торфяников. Их образование приводит к более интенсивной переработке поверхности: ее затемнению, расширению межполигональных понижений. На поверхности торфяника существуют пониженные участки, заросшие мелкими кустами – это площади, на которых распространены слившиеся торфяные пятна-медальоны и где процесс пятнообразования уже завершился. Слияние пятен-медальонов происходит в пределах полигональных ванн и в межполигональных понижениях за счет деятельности снеговых и дождевых вод. При этом происходит уплотнение и зарастание поверхности.

Вблизи межполигональных понижений по инъекциям пятен-медальонов возникают отрывы блоков грунта (рис. 2), их оползание, что ведет к расширению полигональных канав. Стеkanie отдельных пятен-медальонов в понижения способствует сглаживанию бортов канав и выравниванию полигонального микрорельефа.



**Рис. 2.** Отрыв блоков полигона по инъекциям органических пятен-медальонов.

Увеличение количества торфяных пятен-медальонов указывает на неравномерное понижение кровли многолетнемерзлых пород [Королева и др., 2019], неравномерное пучение и осадки в пределах полигонов. В течение 2016-2022 гг наблюдается слияние пятен и увеличение их площади как в центре, так и на валиках полигонов. Инъекции органического материала через слой плотного торфа способствуют возникновению трещин отрыва и оползанию блоков в межполигональные понижения. При этом происходит сокращение площади полигонов, снижение поверхности и перестройка микрорельефа поверхности полигональных торфяников. Таким образом, торфяные пятна-медальоны могут служить индикатором неравномерного локального понижения кровли многолетнемерзлых пород на фоне повышения летних температур в полигональных торфяниках.

*Королева Е.С.* Развитие многолетнемерзлых полигональных торфяников под воздействием изменений природных условий Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири // Дис. канд. геол.-мин. наук. Иркутск. 2022.

*Королева Е. С., Тихонравова Я.В., Мельников В.П., Слагода Е.С., Бабкина Е.А., Бутаков В.И.* Формирование пятен-медальонов в полигональных торфяниках Пур-Тазовского междуречья на фоне современного потепления // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 6. С. 42–51.

## Признаки педогенных процессов в строении и свойствах позднеплейстоценовых отложений термоденудационной котловины «Батагай»

*Лупачев А.В.<sup>1</sup>, Губин С.В.<sup>2</sup>, Данилов П.П.<sup>1</sup>, Занина О.Г.<sup>1</sup>*

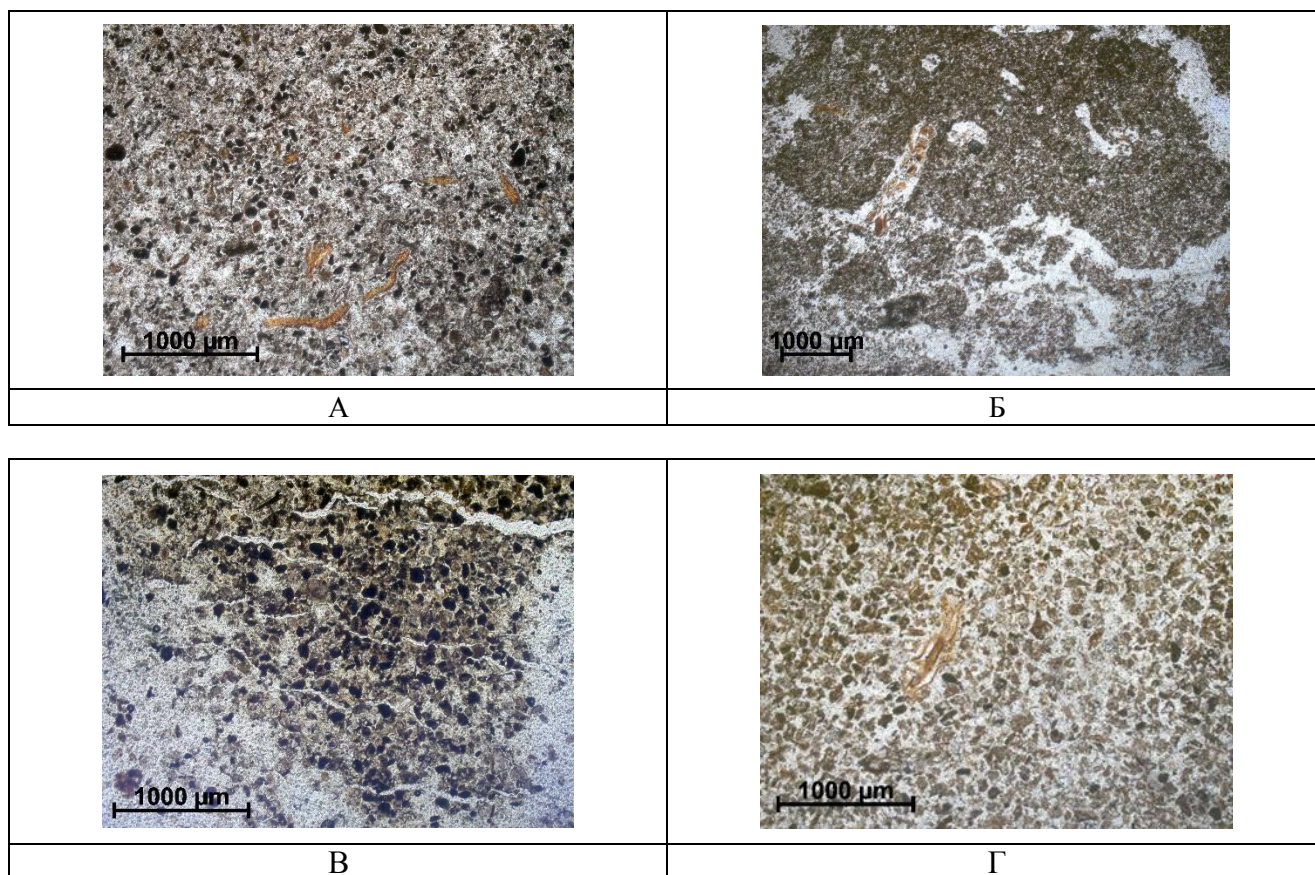
*<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
Московская обл., Пушкино, Россия,*

*<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера им. профессора  
Д.Д. Саввинова, РС(Я), Якутск, Россия  
e-mail: a.lupachev@gmail.com*

На северо-востоке Якутии, в Верхоянском районе Янского плоскогорья, находится широко известный во всем мире крупнейший регрессивный термоденудационный овраг «Батагай» (мощность ~ 80-100 м), который вскрывает стратиграфическую последовательность многолетнемерзлых отложений, накопленных за период среднего-позднего плейстоцена (~ 650-11 тыс. лет назад) и частично трансформированных в течение голоцена [Куницкий, 2013; Ashastina et al., 2017]. В период с 2011 года, коллективом сотрудников НИИПЭС СВФУ, ИМЗ СО РАН, музея мамонта им. П.А. Лазарева НИИПЭС СВФУ, ИФХиБПП РАН проводились рекогносцировочные исследования строения обнажения и определения первичных физико-химических свойств, состава и строения отложений, анализ содержащихся в них палеонтологических находок, в т.ч. микрофоссилий. В 2020 г. были пробурены три опорных стратиграфических скважины (две глубиной около 80 м и одна – более 30 м), произведен полный отбор керн мерзлых отложений.

Выявлено, что толща многолетнемерзлых пород здесь содержит множество проявлений признаков почвообразования – от прослоев с одним погребенным органомным горизонтом, мощность которого достигает местами 40-50 см, а содержание органического углерода до 6%, с остатками стволов и корней древесных растений, до чередования прослоев, обогащенных органическим материалом мощностью до первых десятков см. Органосодержащие прослои характеризуются слабой степенью разложения растительных остатков и могут быть отнесены к материалу торфяно-перегнойных и/или торфянистых почвенных горизонтов с включениями древесины.

Микроморфологический анализ материала из отдельных образцов, в интервале глубин 35-55 м (предварительный возраст, по разным оценкам, составляет от 200-250 до 600-700 тыс. л. [Murton et al., 2021]), показал, что он обладает признаками почвообразования, выраженными в плазменно-песчаной основе, составе и происхождении растительного детрита, а также в содержании продуктов трансформации органического вещества, накапливающегося на зернах скелета. Многие минеральные частицы имеют тонкие светло-коричневые пленки оксидов железа, некоторые слабоокатанные зерна минералов содержат сгустки темноокрашенной органики на поверхности (рис. 1 А). В ряде образцов присутствует оптически неориентированная глина, участвующая в образовании сложных микроагрегатов, включающих минеральные зерна с органическими покрытиями (рис. 1 Б, В). Такие образцы богаты мелким растительным детритом (100–200 мкм) и иногда содержат микрофоссилии преимущественно моховой и травянистой растительности (рис. 1 Г).



**Рис. 1.** Микроморфологическое строение многолетнемерзлых отложений термоденудационной котловины «Батагай». Интервал глубин 35-55 м.

Преобладание слабоокатанного материала, в образцах в интервале глубин 35-55 м, указывает на близость источника его формирования. Почвообразование имело синлитогенный характер и происходило в условиях достаточно высокой теплообеспеченности, периодической смены режимов увлажнения/иссушения и циклов сезонного промерзания/оттаивания. Об этом свидетельствует рубификация, а также слабые признаки перемещения продуктов гумификации из микроних их формирования. Невысокая интенсивность процессов накопления гумусово-железистых пленок позволяет предположить, что почвообразование, протекающее в верхней части профиля, характеризовалось небольшой длительностью. Не исключено, что имело место перевывание почвенного материала на поверхности. Как и в ранее изученных позднеплейстоценовых синлитогенных мерзлотных почвах, в данном случае можно предполагать относительно высокую скорость накопления минерального осадка и быстрый переход во многолетнемерзлое состояние.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работы выполнены при финансовой поддержке РФФ (23-27-00242).

*Куницкий В.В. и др.* Льдистые породы и термоденудация в районе поселка Батагай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь) // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII (1). С. 56-68

*Ashastina K. et al.* Palaeoclimate characteristics in interior Siberia of MIS 6–2: first insights from the Batagai permafrost mega-thaw slump in the Yana Highlands. *Climate of the Past*, 2017, 13, 795–818, <https://doi.org/10.5194/cp-13-795-2017>.

*Murton J. et al.* A multimethod dating study of ancient permafrost, Batagai megaslump, East Siberia. *Quaternary Research*, 2022, 105, 1-22. doi:10.1017/qua.2021.27.

## Динамика оттаивания мёрзлых грунтов на полуострове Файлдс, острова Кинг-Джордж (Ватерлоо), Антарктика

*Мавлюдов Б.Р.*

*Институт географии РАН, Москва, Россия*

*e-mail: bulatrm@bk.ru*

Остров Кинг-Джордж (Ватерлоо) расположен к северу от Антарктического полуострова в пределах архипелага Южных Шетландских островов. Полуостров Файлдс находится в юго-западной части острова. Это самая крупная свободная ото льда территория площадью около 30 км<sup>2</sup>. Рельеф полуострова холмистый с высотами до 150 м над уровнем моря. Здесь преобладают скальные выходы, но на отдельных участках встречаются бедные почвы и грунты.

На полуострове морской климат с относительно теплой зимой и прохладным летом. Средняя годовая температура воздуха по метеостанции Беллинггаузен равна -2,3°C. Средние зимние температуры составляют около -6°C, летние – около 1°C. Среднее годовое количество осадков около 700 мм. В зимнее время преобладают твёрдые осадки, а в летнее – жидкие. Преобладающее направление ветров СЗ и ЮВ. Для полуострова характерна пасмурная погода со средним количеством облачных дней около 20 в месяц.

Здесь развита постоянная мерзлота, которая распространена повсеместно, за исключением днищ крупных озёр, которые за зиму не промерзают (Китеж, Глубокое и др.). Мощность мерзлоты превышает 10 м. Летом с поверхности происходит сезонное оттаивание грунтов и местных почв – криосолей.

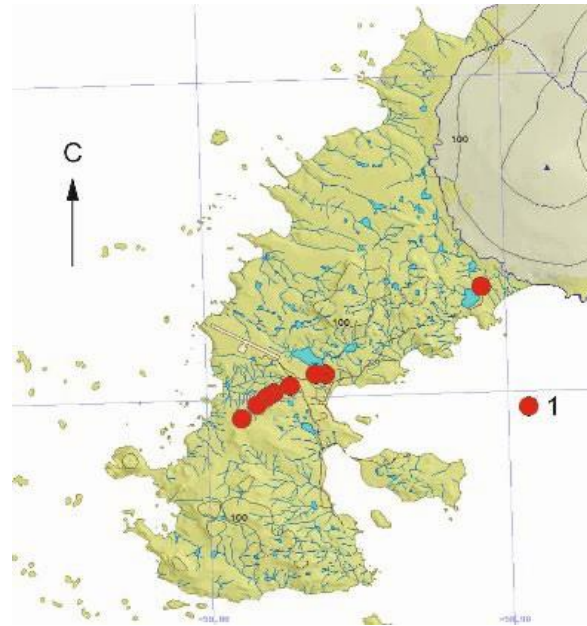
На полуострове Файлдс проводились измерения толщины активного слоя грунтов во время летних сезонов в течение периодов 2007/08 – 2011/12 и 2014/15 – 2022/23 гг. с частотой раз в неделю в 8 точках субширотного профиля от станции Артигас на востоке до горы Рождественской на западе (рис. 1). При этом две точки располагались в пределах галечного пляжа на территории Российской антарктической станции Беллинггаузен. Точки измерений находились на высотах 10-50 м над уровнем моря. На всех участках измерений полностью отсутствовала растительность.

Наши измерения показали, что толщина активного слоя зависит от количества выпавшего за зиму снега. Большая толщина снежного покрова способствует более позднему сходу снега. При этом под нарастающими снежниками в течение всего летнего сезона сохраняется мерзлота. Поэтому чем позже сходит снег, тем на меньшую глубину способен оттаять грунт за летний сезон. Измерения 29.12.2018 г. у края многолетнего снежника, расположенного на склоне, ориентированном на север, в долине, открытой в бухту Биологов, показали, что толщина слоя оттаивания закономерно увеличивалась от 0 до 33 см на протяжении 20 м от края снежника. При этом, чем ближе находиться к границе снежника, тем грунт становился все более насыщенным водой. Содержание воды в рыхло-обломочном грунте могло достигать 17,5% по весу, превращая его в топкое болото. В течение летнего сезона верхняя часть грунтов высыхала и дренировала воду в нижние горизонты. В зависимости от характера грунтов и их местоположения уровень стояния воды в них колебался от 1-3 см от поверхности до полной толщины активного слоя. Первые случаи отмечались в долинах с постоянными водотоками или на участках подпруживания грунтовых вод, а вторые – на приподнятых участках рельефа.

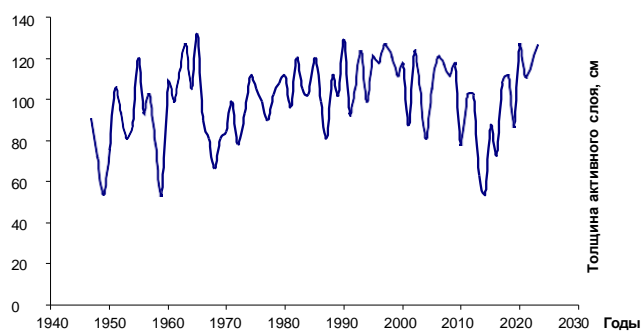
Вторым важным фактором является температура воздуха. Чем выше была средняя летняя температура воздуха (за XII-II месяцы), тем большая глубина оттаивания грунтов оказывалась возможной и тем больше становилась толщина активного слоя. Наиболее благоприятными для увеличения толщины активного слоя оказались солнечные дни, когда в отдельные дни поверхностный слой грунтов в середине дня в январе мог нагреваться до 25°C.

Исследования показали, что имеется довольно хорошая связь между толщиной

активного слоя и средней летней температурой воздуха (коэффициент достоверности около 0,74. Это говорит о том, что средняя летняя температура воздуха является основным фактором, определяющим толщину активного слоя. Толщина снега, накопившегося за зиму, оказалась менее значимым фактором. На основании этой связи была получена следующая зависимость:  $A = 30,051T + 69,153$ , где  $A$  – толщина активного слоя, см,  $T$  – средняя летняя температура воздуха за XII-II месяцы на метеостанции Беллинсгаузен, °С. Достаточно высокий коэффициент достоверности позволяет использовать эту зависимость для восстановления толщины активного слоя для полуострова Файлдс на весь период инструментальных наблюдений. Для построения зависимости были использованы данные по температуре воздуха на станции Беллинсгаузен с 1968 г. ([www.aagi.aq](http://www.aagi.aq)), а данные с 1947 по 1967 г. были добавлены из работы [Ferron et al., 2004]. Полученные результаты показаны на рис. 2.



**Рис. 1.** Полуостров Файлдс острова Кинг-Джордж (Ватерлоо). 1 – точки наблюдений



**Рис. 2.** Расчетные значения толщины активного слоя на полуострове Файлдс за период инструментальных наблюдений

На рис. 2 видно, что за период инструментальных наблюдений толщина активного слоя претерпела серьёзные изменения. До середины 1960-х гг. отмечался преимущественный рост толщины активного слоя, в 1965 г. он достиг 132 см. Затем произошло уменьшение толщины активного слоя до 66 см в 1968 г. и в дальнейшем опять отмечался рост толщины активного слоя, который достигал 129 см в 1990 г., после чего его толщина начинала снижаться. Минимум, равный 54 см, был отмечен в 2014 г., после чего толщина активного



слоя стала расти. Рост продолжался до лета 2022/23 г, когда толщина активного слоя в конце февраля составила 126 см. При этом средняя толщина активного слоя за весь период наблюдений оказалась равна 100 см. Из полученных данных также видно, что начавшееся в последние годы увеличение толщины активного слоя не является чем-то экстраординарным. Нечто подобное уже происходило в предыдущие годы.

Рассмотрим более детально ситуацию лета 2022/23 г. После малоснежной зимы положительные значения средней месячной температуры установились с ноября 2022 до середины апреля 2023 г. Это привело к тому, что в конце летнего сезона на отдельных точках толщина активного слоя возросла до 180 см. Следствием этого стало осушение многих мелких озер и понижение уровня всех озер, которые не питаются талыми водами со снежников и ледникового купола, чего не наблюдалось с 2007 г.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке РАЭ и госзадания АААА-А19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004).

*Ferron F.A., Simões J.C., Aquino F.E., Setzer A.W.* Air temperature time series for King George Island, Antarctica // *Pesquisa Antártica Brasileira (Brazilian Antarctic Research)*. 2004. 4. P. 155-169.

## Криогенные деформации в почвах севера Западной Сибири и их влияние на почвообразование

*Матышак Г.В., Гончарова О.Ю., Чепурнова М.*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
e-mail: matyshak@gmail.com*

Ландшафты, развивающиеся в пограничных, переходных условиях, характеризуются высокой контрастностью и наличием широкого разнообразия вариантов развития экосистем. Особенно это характерно для северотаежных экосистем прерывистой криолитозоны Западной Сибири в связи с чередованием участков с наличием и отсутствием многолетней мерзлоты и разным вкладом криогенных процессов в их формирование. Район исследований (Надымский район, ЯНАО) характеризуется высокой контрастностью геокриологических условий. На современное состояние ландшафтов оказали влияние несколько этапов потеплений и похолоданий, сопровождающихся как агградацией, так и деградацией многолетней мерзлоты. В настоящее время здесь широко распространены лесные экосистемы, где мерзлые породы отсутствуют, а также экосистемы бугристых торфяников с островами мерзлоты. Таким образом, мы можем одновременно наблюдать активные современные криогенные явления (на бугристых торфяниках), а также следы их проявлений в прошлом (в лесных экосистемах). Эти события хорошо читаются в почвенных профилях района исследований и представлены широким набором различного рода деформаций горизонтов.

Для почв мерзлых торфяников характерны классические криотурбационные деформации, представленные хаотичной системой трещин, часто с вихревым рисунком в минеральном горизонте, заполненных вышележащим торфяным материалом. Основной механизм их формирования связан с неравномерным пучением и протаиванием, а также активным морозобойным растрескиванием в пределах деятельного слоя. В результате происходит перемешивание органогенных и минеральных горизонтов, активизация физического разрушения органогенных горизонтов и, в целом, активизация минерализации органического вещества почв. Специфическим вариантом криотурбационных деформаций является часто встречающийся в весенний период на оголенных поверхностях почв (торфяных и минеральных пятнах) стебельковый лед (needle ice), приводящий к активному разрушению поверхности пятен и активизации эрозии почв.

Деформации в почвах лесных экосистем можно разделить на два типа: современные и реликтовые. К современным относятся морозобойные трещины, приводящие к значительному увеличению мощности развитых здесь подзолистых горизонтов. Значительно более широким разнообразием представлены палеокриогенные деформации, отражающие развитие данной территории в периоды похолоданий. Ярким представителем этого типа являются псевдоморфозы по оттаявшим полигонально-жильным льдам. Это регулярная сеть крупных (высотой до 2 м) четких клиновидных структур суглинистого состава, вмещенных в песчаные слоистые аллювиальные отложения. Как правило, именно к деформациям данного типа приурочены мощные языки подзолов, что обусловлено ускоренной фильтрацией почвенных растворов вдоль границ и внутри псевдоморфоз благодаря хорошо выраженной плитчатой структуре и наличию в них большого количества трещин. Также активизации подзолообразования (за счет элювиально-глеевого механизма) способствует выраженный микрорельеф и формирование микропонижений над псевдоморфозами.

Своеобразный тип деформаций представлен небольшими (до 0.5 м) регулярными структурами округлой, кольцевой, каплевидной формы, развитие которого связано с чередованием процессов промерзания-оттаивания отложений и активизации криогенно-конвективного механизма. Эти процессы приурочены, как правило, к определенному типу ландшафтам (бывшее термокарстовое озеро) и приводят к развитию почв с сильнодеформированными профилями, лишенными классического горизонтального

распределения почвенных горизонтов. Минеральные почвы, развивающиеся здесь, сильно турбированы, с языковатыми границами горизонтов, часто с инверсиями горизонтов.

Еще один тип деформаций, широко встречаемый в минеральных горизонтах почв как торфяников, так и лесных экосистем, представлен специфическими вариантами, нарушающими горизонтальное распространение почвенных горизонтов. Это так называемые микросбросы или микронадвиги, образование которых связывается с оползновыми процессами или таянием мерзлых отложений. Их влияние на почвообразование незначительно, однако важна правильная интерпретация генезиса, поскольку схожие деформации могут образовываться и при землетрясениях (сейсмитах).

Таким образом, почвы Надымского района характеризуются широким набором современных и реликтовых деформаций, отражающих сложную криогенную историю развития региона. Происхождение деформаций обусловлено сочетанием разных механизмов, в основном это криогенные процессы растрескивания и пучения, таяния и новообразования мерзлоты, конвективные деформации, а также наложенные на них и усложняющие их форму биогенные, эоловые и, возможно, тектонические процессы.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-24-00020 «Влияние влажности на биологическую активность торфяных почв криолитозоны».

## Температурный режим мерзлых торфяников на южной границе распространения в Западной Сибири

*Московченко Д.В.<sup>1</sup>, Губарьков А.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень, Россия

<sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

e-mail: [Moskovchenko1965@mail.com](mailto:Moskovchenko1965@mail.com)

Неустойчивость многолетнемерзлых пород (ММП) в условиях современных климатических изменений обуславливает необходимость изучения и мониторинга температурного режима почв криолитозоны. В особенности важны такие исследования на участках с неустойчивым состоянием ММП. Южная мерзлота (массивно-островного и островного распространения) развита преимущественно в торфяниках (Шполянская и др., 2022). Южная граница зоны мерзлых болот в Западной Сибири проходит в полосе 63-64° с.ш., на северном макросклоне возвышенности Сибирские Увалы [Болота., 1976]. В пределах этой полосы расположен природный парк Нумто, территория которого сильно заболочена, мерзлые болота чередуются с немерзлыми. Здесь отмечена деградация торфяников, термокарстовое проседание с последующей гидроморфизацией, формирование трещин-просадок [Шишконокова и др., 2016]. Почвы мерзлых бугров относятся к подтипу деструктивных типа торфяных олиготрофных [Аветов и др., 2019]. Таежные почвы представлены ареалами подзолов иллювиально-железистых и мозаиками глеезема и подзола [Аветов и др., 2022]. Целью представленной работы было определение основных температурных параметров почв парка Нумто и факторов, на них влияющих. Было выделено 3 участка в типичных экосистемах, исследован температурный режим мерзлых почв бугра пучения (БП), плоскобугристого торфяника (ПЛ) и немерзлых почв сосняка лишайникового (С). Почва под торфяниками деструктивная торфяная олиготрофная, под сосняком - подзол иллювиально-железистый. На площадках были пробурены наблюдательные скважины, установлена обсадка и термодатчики (логгеры) с поверхности (0-2 см) до глубины 2 м с шагом 0,5 м. Замеры температуры проводились с применением системы автоматического мониторинга «САМ-Н» (ИМКЭС СО РАН г. Томск).

Средняя за период 1969 - 2021 гг. температура воздуха была отрицательной (-3,5°C). Наблюдается отчетливо выраженные тренды роста температуры воздуха и количества осадков, в том числе твердых. Показатели температурного режима почв на разных глубинах (среднегодовая температура  $T_{год}$ , сумма положительных среднесуточных температур  $\sum T > 0$  и отрицательных температур  $\sum T < 0$ ) представлены в табл.1.

Участки, почвы	Показатели	Глубина, м				
		0	0,5	1,0	1,5	2,0
БП, деструктивная торфяная олиготрофная	$T_{год}, ^\circ C$	0,8	1,1	1,3	0,9	-0,1
	$\sum T > 0$	1609	1215	837	347	0
	$\sum T < 0$	-1331	-853	-391	-18	-29
ПЛ, деструктивная торфяная олиготрофная	$T_{год}, ^\circ C$	1,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2
	$\sum T > 0$	1040	6	0	0	0
	$\sum T < 0$	-560	-153	-144	-96	-80
С, подзол иллювиально-железистый	$T_{год}, ^\circ C$	4,5	3,5	2,6	1,7	0,4
	$\sum T > 0$	1854	1204	1057	608	164
	$\sum T < 0$	-1321	-923	-101	0	0

**Табл. 1.** Показатели температурного режима почв (средние данные по периоду сентябрь 2019–август 2022 гг.)

Среднегодовая температура поверхности почвы, в отличие от среднегодовой температуры воздуха, была положительная на всех обследованных участках: +0,8°C на бугре пучения, +1,3°C на плоскобугристом торфянике и +4,5°C в подзоле. Относительно

низкая температура поверхности БП связана с малой мощностью снежного покрова, вследствие чего почва хорошо охлаждается зимой. Однако летом почва здесь прогревается сильнее. Длительность периода отрицательных температур и глубина промерзания обследованных почв различна. Наиболее длительный период с отрицательными температурами поверхности (202-205 дней) отмечен на плоскобугристом торфянике. Начиная с глубины 0,5 м весь год торф находится в мерзлом состоянии (мерзлота сливающегося типа). На бугре пучения период отрицательных температур длится около 200 дней. На глубине 1,5 м температура в нем не падает ниже  $-0,1^{\circ}\text{C}$  (мерзлота несливающегося типа). По сравнению с аналогичными почвами Надымского стационара [Гончарова и др., 2015], мерзлотные почвы парка Нумто отличаются более высокой температурой и более глубоким сезонным протаиванием. В соответствии с классификацией теплового режима [Димо, 1971], исследованные почвы относятся к разным категориям. Почва БП относится к длительно-сезоннопромерзающему типу: мерзлота в ней несливающаяся, среднегодовая температура в верхних 50 см положительная. Почвы ПЛ относятся к мерзлотному типу, для них характерна сливающаяся мерзлота и отрицательная среднегодовая температура.

Почвы бугра пучения, по сравнению с плоскобугристым торфяником, отличаются большей глубиной сезонного протаивания (около 2 м) и более высокой температурой летнего сезона вследствие лучшей теплообеспеченности. Следовательно, они наименее устойчивы к потеплению.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 23-27-00366 «Современная динамика мерзлых торфяников на южной границе распространения в Западной Сибири»

*Аветов Н.А., Кузнецов О.Л., Шишконокова Е.А.* Опыт использования классификации и диагностики почв России в систематике торфяных почв биогеоценозов олиготрофных болот северотаежной подзоны Западной Сибири *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17.*

*Почвоведение.* 2019. № 4. С. 37-47.

*Аветов Н.А., Шишконокова Е.А., Кинжаев Р.Р., Арзамасова А.В.* Структура почвенного покрова заболоченной равнины северо-таежной подзоны Западной Сибири (бассейн р. Казым). *Почвоведение*, 2022. №2. С. 208-218.

*Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим //* Под ред. К.Е. Иванова, С.М. Новикова. Гидрометеоиздат. Л. 1976. 447 с.

*Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Москаленко Н.Г., Пономарева О.Е.* Температурные режимы северотаежных почв Западной Сибири в условиях островного распространения многолетнемерзлых пород. *Почвоведение*, 2015, № 12, с. 1462–1473 *Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Березина Н.А., Толышева Т.Ю., Шведчикова Н.К.* Проявления регрессивных процессов на болотах южной части природного парка Нумто (Ханты-Мансийский автономный округ - Югра) // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический.* 2016. Т. 121. № 3. С. 39-50.

*Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В.* Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского Севера России) // *Географическая среда и живые системы.* 2022. № 1. С. 6–30.

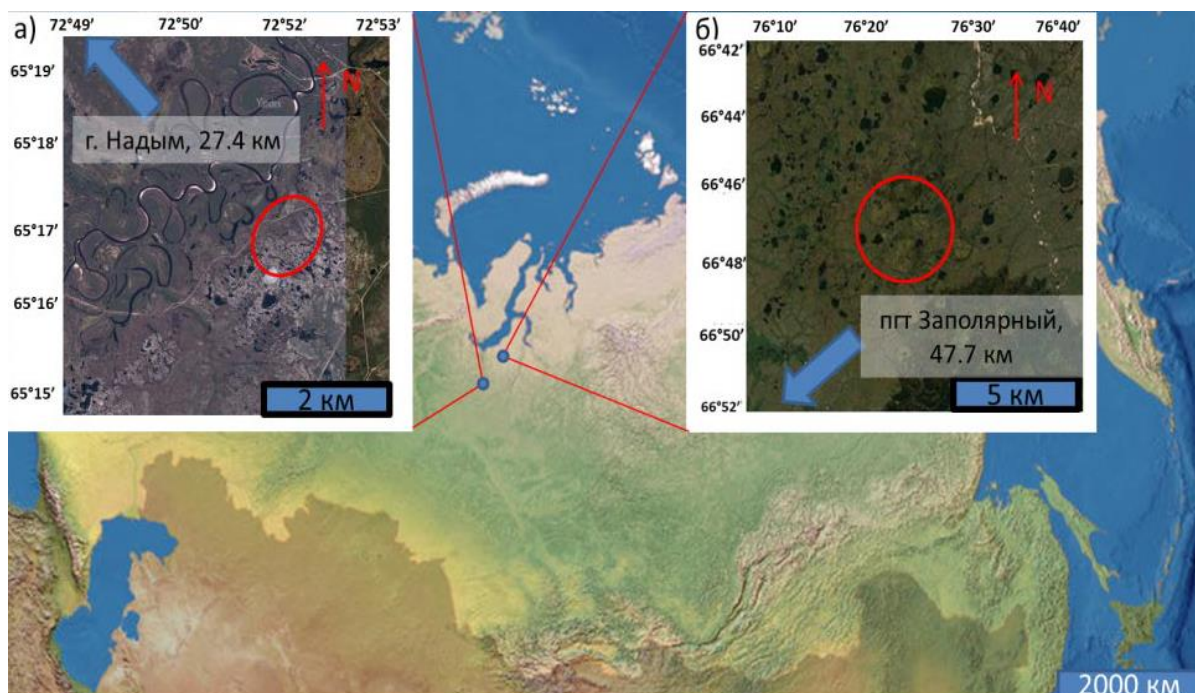
## Пирогенные трансформации мерзлотных почв северной тайги и южной тундры севера Западной Сибири

Петров Д.Г.  
Институт географии РАН, Москва, Россия  
e-mail: pd437807@mail.ru

Исследования пожаров в бореально-субарктической зоне России показали, что они являются сложными, динамичными, неоднородными в пространстве по силе, интенсивности и устойчивости явлениями [Дымов, 2020]. Гари, таким образом, неоднородны по степени пирогенных трансформаций растительности и почв [Fire effects..., 2009]. В зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП) пирогенная трансформация почв с малой мощностью сезонно-талого слоя (СТС) осложнена комплексом физических явлений, выражающихся в повреждении подстилки, турбациях почвенного профиля, заболачивании и изменении альбеда поверхности. Пирогенный углерод (РyC), образующийся в процессе горения, консервируется в профиле почв, выходя из биологического круговорота [Gavin, 2003]. Актуальность исследования заключается в (1) определении степени пирогенной трансформации подстилки и минеральной части почвы для оценки скорости восстановления экосистем и (2) в изучении распределения углистых частиц по профилю почвы для моделирования миграций РyC, вышедшего из биологического круговорота.

Цель исследования – определить общее направление постпирогенной трансформации почв и растительности и, в частности, изменения в вертикальной миграции РyC по профилю почв экосистем южной тундры и экотона северная тайга-кустарниковая тундра в районах, соответственно, сплошного и островного распространения ММП. Задачи: (1) определить закономерности постпирогенной трансформации пиропитных сообществ северной тайги и тундры; (2) представить модели миграции РyC по профилю почв в зоне островных и сплошных ММП.

Районы исследований и их параметры представлены ниже (Рис.1).



**Рис. 1.** Районы исследований.

- а) окрестности г. Надым – экотон северная тайга-кустарниковая тундра;  
б) окрестности пгт Заполярный – южная тундра.

Результаты исследований. Закономерности постпирогенной трансформации экосистем зависели от типа почв, параметров пожара, типа и влажности допозарного напочвенного покрова (рис. 2).



Рис. 2. Постпирогенные изменения почв и подстилки.

Кроме собственных исследований использованы материалы

И.С. Мелехова, Н.П. Курбатского, А.А. Дымова, Ф.Р. Зайдельмана, М.В. Бобровского.

Распределение углистых частиц по профилю почвы описывается тремя моделям (рис. 3). Концентрация антракомассы распределялась по профилю аккумулятивно – от 1000±500 мг/кг в верхней части профиля (ОН, граница ОН/Е и Т или От для глееземов), до 100±50 мг/кг на границе Е/ВНФ и < 100 мг/кг в горизонте ВС и G для глееземов.

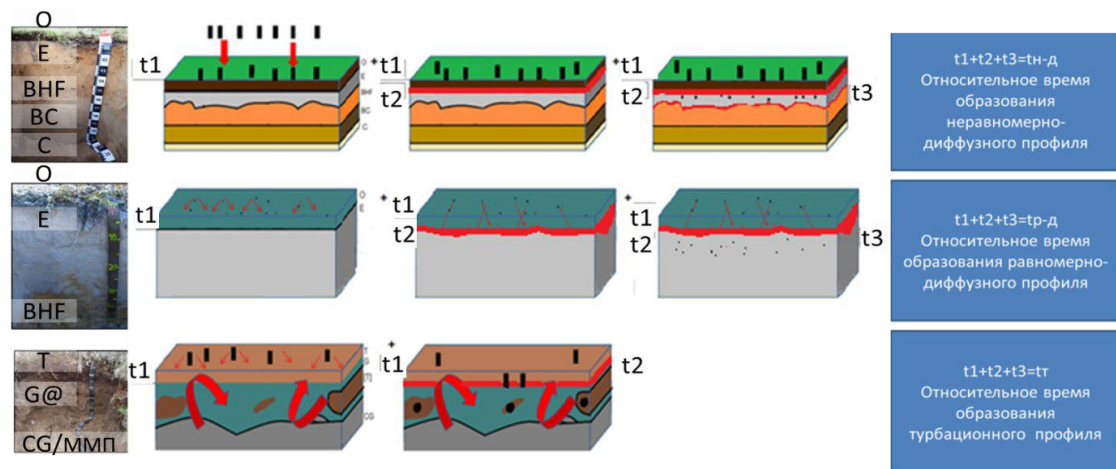


Рис.3. Модели миграции углистых частиц: неравномерно- и равномерно-диффузная и турбационная.

**БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Выражаю благодарность Г.В. Матышаку, О.Ю. Гончаровой и коллективу SoilArt (МГУ, Кафедра общего почвоведение), а также ИКЗ СО РАН за организацию экспедиций; С.В. Горячкину, Н.С. Мергелову и А.А. Гольевой за научные консультации.

Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми / М.: ГЕОС, 2020. с. 336.

Fire Effects on Soils and Restoration Strategies / A. Cedra, P.R. Robichaud (eds.), 2009, Vol. 5, 577 pp. doi.org/10.1201/9781439843338.

Gavin D.G. Forest soil disturbance interval inferred from soil charcoal radiocarbon dates // Can. J. For. Res., 2003, Vol. 33, 2514-2518 pp. doi.org/10.1139/x03-185.

## Исследование ландшафтно-мерзлотных условий карбонового полигона (п-ов Ямал)

*Сидорова Т.А., Николаева Е.С., Гребенец В.И., Юров Ф.Д.*  
*Московский государственный университет им Ломоносова, Москва, Россия*  
*e-mail: tatasidorof@yandex.ru*

Эмиссия парниковых газов из почвенно-растительных покровов тундры в последние десятилетия входит в приоритетные направления естественных наук; выполнения полевых наблюдений за этим процессом вносит весомый вклад в решение проблемы. В последние 2-3 года в России создается сеть полигонов (т.н. карбоновых), где на основе постоянного мониторинга будут отслеживаться количественные показатели эмиссии в различных географических зонах: от тундры до субтропиков. Безусловно, главным фактором выхода парниковых газов являются процессы в почвах и растительном покрове, это особо актуально для тундровых пространств [Глаголев, 2007].

В 2022 году на северо-восточном участке Ямальского «Карбонового полигона» проведены полевые наблюдения за сезонно-талым слоем (СТС) и ландшафтными условиями: в зависимости от дренированности (заболоченности) участков, от мощности СТС, от типа почв.

Изучение ландшафтно-мерзлотных условий проводилось в пределах II Каргинской террасы, представляющей из себя пологоволнистую поверхность, осложненную отдельными термокарстовыми озерами, а также долиной реки Вындяда и связанными с ней овражно-балочными системами временных и постоянных водотоков [Трофимов, 1989]. Площадь изучаемой территории составила 2.5 км<sup>2</sup>. Перепад высот составил 20 м.

По итогам двух дней работы на изучаемом полигоне были определены 10 основных ПТК (природно-территориальные условия):

- 1) бугорковатая кустарничково-осоково-моховая тундра;
- 2) кочковато-бугорковатая переувлажнённая поверхность тундры, занятая осоково-моховыми растительными сообществами;
- 3) бугорковатая тундра с зарослями ерника;
- 4) заболоченная, местами обводнённая мохово-осоковая тундра с отдельными кустарничками (в небольших термокарстовых депрессиях) и в нижних частях овражно-балочных систем;
- 5) пятнисто-медальонная бугорковатая кустарничково-кустарничково-мохово-лишайниковая тундра;
- 6) мелкобугристая относительно дренированная кустарничково-осоково-моховая тундра;
- 7) листовенничная редина с пушицево-кустарничково-кустарничковым ярусом;
- 8) обводненные участки, вокруг озер с пушицево-осоково-моховой растительностью;
- 9) крупно полигональная кустарничково-лишайниково-мохово-осоковая тундра;
- 10) долинный комплекс реки Вындяда.

На каждой точке проводилось изучение состава грунтов. В пределах всего полигона вскрывались преимущественно биогенные и аллювиальные отложения. Первые были представлены торфом разной степени разложения. Верхнеплейстоценовые аллювиальные отложения состояли в основном из пылеватых, оглеенных и ожелезненных супесей, суглинков. Важную теплоизолирующую роль играл почвенно-растительный покров, т.к. уменьшение глубины СТС снижает эмиссию парниковых газов, накопленных в мерзлых грунтах [Анисимов, 2005].

Например, в центре пятна-медальона (почти лишённого растительности) на глубине 10 см разница температуры грунтов с поверхностью составляла 7,5°C, а в пределах заболоченных участках осоково-моховой тундры -21,5°C.

Исследования показали, что, несмотря на кажущуюся однородность ландшафтов



(типичная тундра), существует большая вариабельность типов местности, отличающихся почвенно-грунтовыми условиями и глубиной сезонного промерзания. Максимальные значения мощности сезонно-талого слоя в пределах полигона наблюдались в обводненных и заболоченных участках, занятых торфяно-мохово-осоковой растительностью, и достигали 120 см.

*Анисимов О.А., Лавров С.А., Ренева С.А.* Оценка эмиссии метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России при изменении климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2005 Т. 20. С 124-141.

*Глаголев М.В., Головацкая Е.А., Шнырев Н.А.* Эмиссия парниковых газов на территории Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2007. Т. 14. № 2. С. 197-210.

*Трофимов В.Т.* Орография // Геокриология СССР. Зап. Сибирь. М.: Наука. 1989. С. 38.

**Влияние природных пожаров в лесотундре на органическое вещество почв**

*Филимоненко Е.А.<sup>1</sup>, Упорова М.А.<sup>1</sup>, Курганова И.Н.<sup>1,2</sup>, Лонес В.О.<sup>1,2</sup>,  
Соромотин А.В.<sup>1</sup>, Кузяков Я.В.<sup>1,3</sup>*

*<sup>1</sup>Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия*

*<sup>2</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пуцино, Россия*

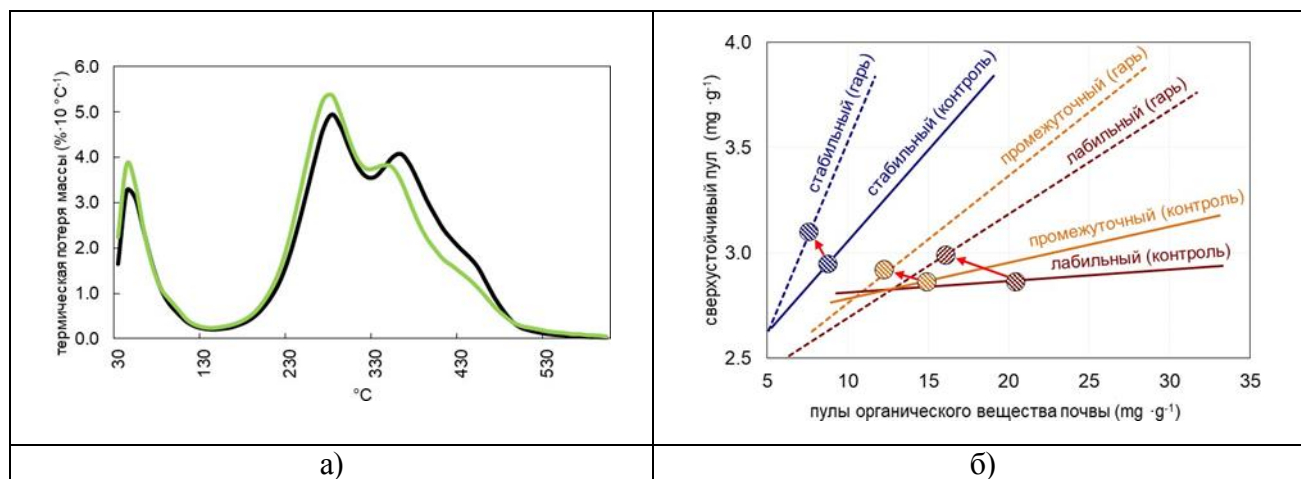
*<sup>3</sup>Университет Геттингена, Геттинген, Германия*

*e-mail: eafilimonenko@mail.ru*

Экосистемы высоких широт являются одним из ключевых резервуаров углерода в глобальном масштабе. Низкие температуры и переувлажненность почв обеспечивают условия для длительной секвестрации углерода за счет превышения скоростей поступления органического вещества (ОВ) над скоростями его микробной минерализации. Природные пожары влияют на почвенные запасы углерода: с одной стороны, приводя к быстрым потерям углерода в форме CO<sub>2</sub>, с другой, трансформируя часть органических соединений в конденсированные устойчивые формы с большим временем оборота, что способно компенсировать потери углерода. За последние 35 лет более 10% территории лесотундры Западной Сибири было трансформировано природными пожарами [Moskovchenko et al., 2020]. Драйверами возникновения природных пожаров на субарктических территориях являются хозяйственная деятельность человека и глобальные изменения климата [McCarty et al., 2021]. Скорость климатических изменений в арктическом регионе в четыре раза превышает средние темпы изменения климата на планете [Rantanen et al., 2022]. В связи с этим задача оценки степени влияния пожаров на соотношения потерь и стабилизации почвенного углерода является актуальной для понимания вклада пирогенного фактора в глобальный цикл углерода.

Для оценки влияния природных пожаров на стабильность ОВ почв лесотундры Западной Сибири были проведены исследования четырех постпирогенных участков, с момента пожаров на которых прошло от 2 до 8 лет. Для каждого постпирогенного участка в качестве референтного был исследован участок, где пожаров не было минимум 50 лет. Оценка стабильности ОВ почв проводилась для верхнего органического горизонта, наиболее подверженного пирогенному воздействию, с использованием метода синхронного термического анализа. Синхронный термический анализ включал термогравиметрию и дифференциальную сканирующую калориметрию при нагревании образцов со скоростью 2 °C в минуту в диапазоне от 25 до 650 °C в окислительной атмосфере (TGA/DSC 3+, Mettler Toledo, Switzerland). Обработка данных термического анализа проводилась по методу оценивания температурных потерь массы образца на каждые 10°C [Tokarski et al., 2020] и последующим выделением термоокислительно лабильного пула (термическое окисление ОВ в интервале 250-310°C), промежуточного (термическое окисление в интервале 310-370°C), стабильного (термическое окисление в интервале 370-420 °C) и сверхустойчивого (термическое окисление в интервале 500-610°C).

До 30% ОВ почв приходится на термоокислительно лабильный пул. Природные пожары в лесотундре приводят к уменьшению доли лабильного пула за счет первостепенного окисления и потерь в виде CO<sub>2</sub> наименее стабильных органических соединений, например, целлюлозы или гемицеллюлозы, а также реакций дегидратации алифатических структур. При этом пирогенный прирост лабильного пула возможен в результате деполимеризации сложных органических молекул, например, лигнина, обладающего большей исходной термоокислительной стабильностью. Реакции циклизации и конденсации приводят к увеличению в постпирогенных почвах доли термоокислительно стабильного и сверхустойчивого пулов ОВ (рис. 1а). Усиление взаимосвязей между пулами органических веществ со сверхустойчивым пулом в постпирогенных почвах указывает на увеличение общей стабильности органического вещества почв после пожара (рис. 1б).



**Рис. 1.** Кривые потерь массы постпирогенных (черная линия) и контрольных (зеленая линия) почв по данным термического анализа (а); зависимости содержания пулов ОВ почв от сверхстойчивого пула в контрольных (сплошная линия) и постпирогенных (пунктирная линия) почвах (б); (кругами обозначены средние величины содержания пулов ОВ в почвах).

Полученные данные о трансформации термоокислительной стабильности органического вещества почв под воздействием пожаров в лесотундре важны для оценки качества запасов почвенного углерода в контексте увеличения частоты и интенсивности пожаров на субарктических территориях как следствия изменения климата.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Исследование выполнено в рамках проекта TerraArctic (Тюменская область Правительственный проект № 89-ДОН) и CarboRus (075-15-2021-610).

McCarty J.L., Aalto J., Paunu V.V., Arnold S.R., Eckhardt S., Klimont Z., Fain J.J., Evangeliou N., Venäläinen A., Tchepakova N.M., Parfenova E.I., Kupiainen K., Soja A.J., Huang L., Wilson S. Reviews and syntheses: Arctic fire regimes and emissions in the 21st century. // *Biogeosciences*, 2021, Vol. 18, pp. 5053–5083. DOI: 10.5194/bg-18-5053-2021  
 Moskovchenko D.V., Aref'ev S.P., Moskovchenko M.D., Yurtaev A.A. Spatiotemporal Analysis of Wildfires in the Forest Tundra of Western Siberia. // *Contemp. Probl. Ecol*, 2020, Vol. 13, pp. 193–203. DOI: 10.1134/S1995425520020092.

Rantanen M., Karpechko A.Yu., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. // *Commun Earth Environ*, 2022, Vol. 3, No 168. DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3  
 Tokarski D., Wiesmeier M., Doležalová Weissmannová H., Kalbitz K., Scott Demyan M., Kučerík J., Siewert C. Linking thermogravimetric data with soil organic carbon fractions. // *Geoderma*, 2020, Vol. 362, No. 114124. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114124.

## Криоземы долины южного макросклона Западного Саяна

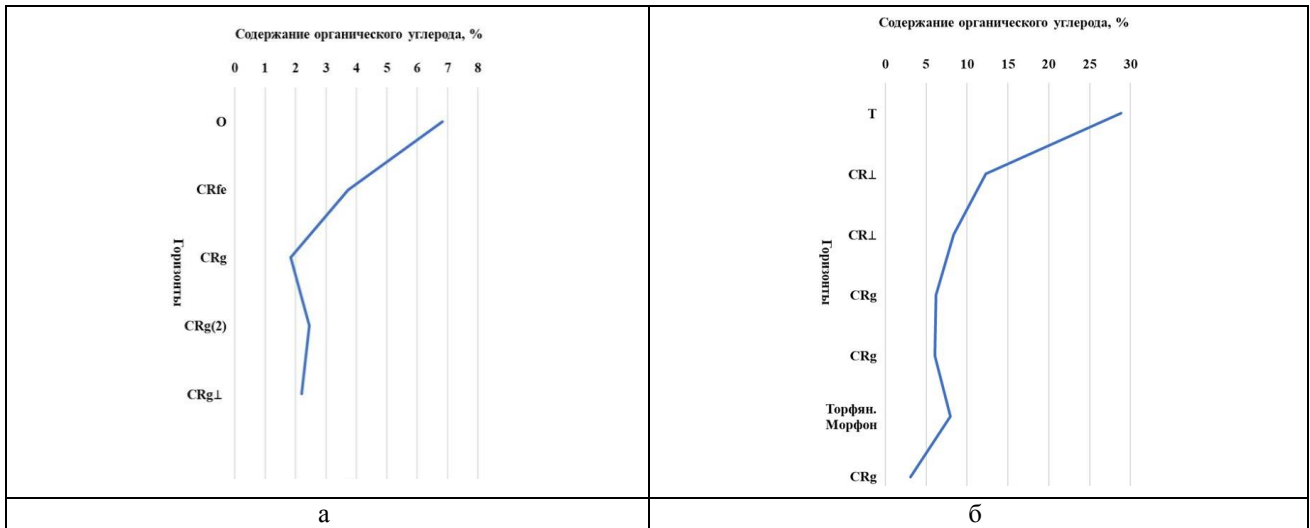
*Хлопцова Д.Д., Крицков И.В.*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
e-mail: dasha.khloptsova@gmail.com*

Мерзлые бугристые болота в высокогорьях Южной Сибири еще недостаточно изучены, в отличие, например, от болот в Западной Сибири, хотя они могут быть еще более чувствительны к происходящим изменениям климата [Kirpotin et al., 2022]. Исследование почв проводилось в долине реки Кара-Суг, дренирующей восточный склон Хемчикского хребта Западного Саяна. Территория исследования характеризуется условиями повышенного увлажнения за счет локального выполаживания долины и локализации стока с нескольких мезоводосборов. Особенностью исследуемого ландшафта является наличие криогенных форм рельефа, представленных чередованием криогенных бугров и западни с перепадами высот в несколько метров. Для характеристики почвенного покрова мерзлого болота была заложена catena согласно неровностям микрорельефа. Один разрез был заложен на вершине бугра пучения – криозем глееватый бескарбонатный, ненасыщенный мелкоторфянистый среднесуглинистый иловато-крупнопылеватый (Т22-19), другие два – в понижении: это торфяно-криозем глееватый бескарбонатный, насыщенный торфянистый тяжелосуглинистый среднепылевато-крупнопылеватый (Т22-20) и криозем глееватый бескарбонатный, насыщенный мелкоторфянистый тяжелосуглинистый среднепылевато-крупнопылеватый (Т22-21). Похожие почвы были описаны в Горно-Алтайской автономной области [Ковалев, 1973]. Их классифицировали как горно- тундровые гидроморфные почвы, которые являются элементом ландшафта горно- долинной и тектонико-депрессивной заболоченной тундры высокогорий. На территории Западного Саяна подобные почвы ранее отмечали, как горно-тундровые глеевые (заболоченные), возникающие при избыточном увлажнении в седловинах хребтов и других отрицательных формах рельефа [Смирнов, 1970].

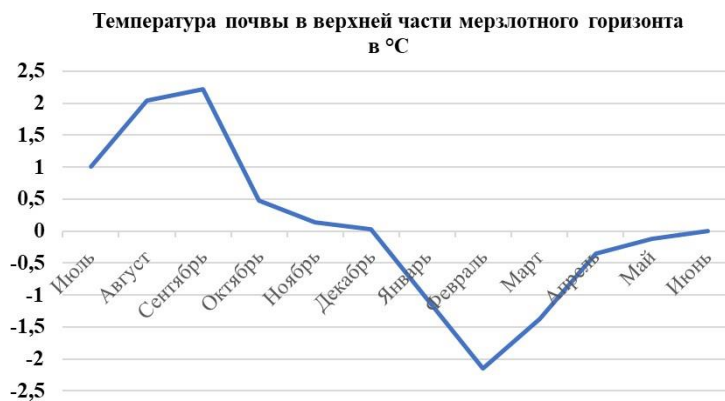
Исследованные почвы в силу особенности геоморфологического положения, сильно переувлажнены и содержат значительное количество льдистых линз и прожилок. Так некоторые горизонты на 80% состоят из замёрзших почвенных вод. Согласно аналитическим данным, преобладающими фракциями в данной почве являются крупная пыль (от 36 до 55%), средняя пыль (10-26%) и мелкий песок (5-28%). Профиль почвы слабо дифференцирован по значениям рН, отмечались кислая, слабокислая и близкая к нейтральной реакция среды. Поведен также анализ на содержание валового азота в почве. Самые высокие значения показал торфяно-криозем, где содержание валового азота составило от 2,3% до 1,2%. В криоземах значения варьировались от 0,1% до 1,5%, уменьшаясь с глубиной.

Полученные данные показывают высокое содержание углерода по всему профилю почвы. В верхних горизонтах криоземов содержание органического углерода составляет от 6 до 8%, далее снижается с глубиной до 2-3% (рис. 1). В торфяно-криоземе значения органического углерода выше, они составляют 23% в верхнем горизонте и 19% в нижнем. В составе обменных катионов преобладает  $\text{Ca}^{2+}$ . В исследуемых почвах значения обменного  $\text{Ca}^{2+}$  достигали 38 мг-экв/100г почвы, а  $\text{Mg}^{2+}$  – 10 мг-экв/100г почвы. Содержание обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  снижается с глубиной, как и насыщенность основаниями почв (от 94% до 38%).



**Рис. 1.** Содержание органического углерода:  
а – в криоземе Т22-19, б – в криоземе Т22-21.

Для характеристики температурного режима проведено измерение температуры почвы регистратором температуры TR-5L (DS1925L-F5). Он был установлен на глубине 70-80 см, на поверхности мерзлого горизонта. Измерения фиксировались в течение года. Согласно полученным данным, на этой глубине с момента установки прогрессировало увеличение температуры, достигая 2,5°C (Рис. 2). Отрицательные температуры установились лишь в конце ноября, что свидетельствует об отсутствии мерзлоты на этой глубине в летний и осенний период.



**Рис. 2.** Данные температуры почвы с июля 2021 г. по июнь 2022 г.

Таким образом, формирование исследованных криоземов, вероятно, связано с наличием не многолетнемерзлых пород, а длительной сезонной мерзлоты с возможностью ее «перелетовывания» в особо холодные годы.

*Kirpotin S.N., Kvasnikova Z.N., Potapova S.A., Volkova I.I., Volkov I.V., Pyak A.I., Byzaakay A.A., Kolesnichenko L.G., Lushchaeva I.V., Khovalyg A.O., Kuzhevskaia I.V., Chursin V.V., Peregon A.M.* Pilot Studies of the Unique Highland Palsa Mire in Western Sayan (Tuva Republic, Russian Federation). *Atmosphere*. 2022; 13(1):32. <https://doi.org/10.3390/atmos13010032>.

*Ковалев Р.В.* Почвы Горно-Алтайской автономной области. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1973. 350 с.

*Смирнов М.П.* Почвы Западного Саяна. М.: Наука, 1970. 235 с.

## Криогенные пирогенные почвы Ямало-Ненецкого автономного округа

*Чебыкина Е.Ю., Низамутдинов Т.И., Абакумов Е.В.*

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: e.chebykina@spbu.ru*

Воздействие различных природных (ветровалы, вспышки численности вредителей), природно-антропогенных (пожары) и антропогенных (лесозаготовки) явлений вызывает демутиационные смены в естественных экосистемах. Важным фактором, нарушающим ход естественных процессов в биогеоценозах, являются лесные пожары, последствия которых трудно прогнозируются. Лесные пожары относительно редки в экосистемах субарктической тундры, но они могут сильно изменить свойства экосистем [Dymov et al., 2018]. В настоящее время последствия лесных пожаров в Арктике – одна из наиболее актуальных тем научных исследований, особенно в связи с оценкой роли экосистем тундры в процессах выделения и сохранения углерода [Doerr and Santin, 2016]. Большая часть выбросов черного углерода в Арктике происходит на севере России в результате именно лесных пожаров на огромных территориях, которые вносят значительный вклад в общую эмиссию черного углерода в атмосферу. В соответствии с результатами последних работ по моделированию климатических изменений ожидается, что с потеплением климата частота тундровых пожаров будет увеличиваться. Вследствие этого огромные пространства вечной мерзлоты из-за глобального потепления становятся источниками парниковых газов (водяных паров, углекислого газа и метана). Понимание долгосрочных последствий пожаров необходимо для прогнозирования будущих изменений экосистем Арктики и их роли в процессах секвестрации углерода [Maksimova, 2019]. Поэтому отдельное внимание должно быть уделено роли пирогенного фактора в деградации и дегумификации криогенных почв. Исследование изменений почв после воздействия лесных пожаров в циркумполярном регионе и явилось целью данной работы.

Авторами в 2016, 2021 и 2022 гг. проводились исследования постпирогенных почв в тундровой зоне Надымского района Ямало-Ненецкого автономного округа: на примере территории Надымского лесничества и вблизи поселка Пангоды. Воздействию пожаров изученных периодов был подвержен верхний слой моховой подстилки. Исследования послепожарной динамики почвенного покрова проводили на участке, пройденном пожаром, и на участке, не подвергавшихся действию огня. На некоторых исследованных участках границей между фоновым и пирогенным участками были естественные барьеры. В частности, на 318-ом км трассы Салехард-Надым ручей без названия стал барьером для дальнейшего распространения пожара, поэтому участки расположены по обе стороны от ручья на расстоянии около 100 м (рис. 1).

Почва пирогенного участка представлена подзолом-элювоземом пирогенным (Folic Cambisols – WRB) со строением профиля Apig–E–BC–C. Следует отметить, что постпирогенные почвы слабо укладываются в рамки существующих почвенных классификаций. Почвы постпирогенной сукцессии представлены поверхностными органомогенными горизонтами, сохраняющими следы пирогенного воздействия – сгоревший моховой очес. Наличие углистых частиц визуалью диагностируется на границе органомогенного и подзолистого горизонтов. В нижней части профиля почвы имеют типичное для подзолов-элювоземов строение.

Моховой очес, подстилка ягельная и верхний гумусовый горизонт испытывают максимальное воздействие огня при пожаре в результате чего происходит потеря органического вещества и формирование «пирогенного гумуса», устойчивого к биодеструкции и окислению.



**Рис. 1.** Ручей без названия (по центру) – барьер для распространения лесных пожаров на исследованной территории: слева от ручья – пирогенный участок, справа – фоновый.

В связи с низкими запасами надземной фитомассы в тундровых экосистемах основное воздействие пожара приходится именно на подстилку и органогенные почвенные горизонты. При этом большинство пожаров в тундре можно отнести к средней интенсивности, при которых сгорает надземная фитомасса, слой подстилки, а также частично органогенный горизонт почвы.

В рамках исследования изучены морфологическая организация профиля постпирогенных почв, а также влияние пожара на основные химические, физические, физико-химические и биологические свойства почв и оценена временная динамика изменения свойств после пожаров, выявлены постпирогенные изменения системы органического вещества почв, а также составлен долгосрочный прогноз динамики запасов органического вещества притундровых лесов под влиянием лесных пожаров с помощью вычислительных экспериментов.

Полученные данные свидетельствуют об интенсивной морфологической трансформации верхнего слоя почвы, о снижении содержания органического вещества, а также обогащение его азотом. Лесные пожары также приводят к полной трансформации состава ПАУ. Сумма ПАУ интенсивно увеличивается, как и содержание бенз(а)пирена в почвах. Структурный состав ПАУ изменился под действием пожаров: в прогоревших почвах преобладали компоненты пирогенного происхождения. Таким образом, даже разовое воздействие пожара приводит к серьезной трансформации геохимического состояния почвы.

Исследование каждого района арктических и субарктических регионов важно с точки зрения неточностей общих оценок запасов углерода и определения прогнозов пожарных и послепожарных событий в России, вызванных довольно сильной кластеризацией данных.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке НЦМУ «Агротехнологии будущего». Работа посвящена 300-летию Санкт-Петербургского государственного университета.

*Doerr S.H. and Santun C.* Global Trends in Wildfire and Its Impacts: Perceptions Versus Realities in a Changing World // *Philos. Trans. R. Soc. B*, 2016, No. 371: 20150345. DOI: 10.1098/rstb.2015.0345.

*Dymov A.A., Abakumov E.V., Bezkorovaynaya I.N., Prokushkin A.S., Kuzakov Y.V. and Milanovsky E.Y.* Impact of Forest Fire on Soil Properties (Review). // *Theor. Appl. Ecol.*, 2018, No. 4, pp. 13–23. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-4-013-023.

*Maksimova E., Abakumov E. and Shamilishvili G.* Sustainable Development of Forest Ecosystems in Urbanized Territories as a Way of Wildfire Control in Russia // In: *Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services* (Vasenev et al. (eds)). SUITMA 2017. Springer Geography. Springer, Cham. 2019. Pp. 279-288. DOI: 10.1007/978-3-319-89602-1\_33.

**Выявление динамики деградации мерзлых торфяных почв  
плоскобугристых болот на южном пределе их распространения  
(бассейн р. Казым, Западная Сибирь)  
на основе геоботанической индикации**

*Шшиконокова Е.А.<sup>1</sup>, Толпышева Т.Ю.<sup>2</sup>, Аветов Н.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*  
*e-mail: shishkonakova\_ea@esoil.ru*

В настоящее время наиболее динамично процессы, связанные с деградацией мерзлоты, проявляются на южном пределе распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Для Западной Сибири такой зоной является территория, примыкающая к Сибирским Увалам, в том числе и входящая в природный парк «Нумто». Массивы ММП в этой части криолитозоны редкоостровные, как правило, приурочены к центральным частям торфяников [Геокриология..., 1989], большая часть которых на территории парка представлена плоскобугристыми болотами. Температура многолетнемерзлых пород здесь составляет -0,5...-0,1°C, что на 0,5 градусов выше измеренной в 70-80 гг. прошлого века, при этом уменьшение площади мерзлых торфяников, составило около 10-20%. [Губарьков и др., 2022]. Изменение температурного фона приводит к масштабным проявлениям процессов деградации ММП. В определенной степени оценить скорость их развития позволяют изменения в характере растительного покрова. Одновременно важно отметить, что установление индикационных свойств растительности возможно лишь для конкретного района, для которого выявлена связь между определенными растительными сообществами и мерзлотными условиями [Общее мерзлотоведение, 1974].

В течение 11 лет нами велись наблюдения за 5 буграми плоскобугристых болот, расположенных в южной части парка «Нумто» (бассейн р. Казым), имевших проявления деградации на момент первого осмотра. Наиболее интенсивно процесс деградации мерзлоты проходил в годы повышенного обводнения болот на низких буграх. Так, за период наблюдений 3 бугра (высотой от 20 до 50 см) полностью протаяли, частично сохранившиеся 2 бугра имели максимальную высоту до 0,7 и 1,20 м. Полученные результаты позволяют выделить некоторые индикационные признаки, характерные для разных временных стадий развития процессов термокарста в этом районе.

К проявлениям начальной стадии вытаивания льда можно отнести возникновение пятен оголенного торфа, появление вогнутых участков и трещин в лишайниковом ярусе, сформированном преимущественно из кустистых лишайников рода *Cladonia* с участием видов родов *Cetraria* и *Alectoria*. При замедлении термокарстового процесса на участках с деградированным покровом происходит вторичное поселение лишайников преимущественно с бокальчатými или шиловидными подециями и мхов (чаще всего политриховых, *Pohlia nutans*, *Dicranella cerviculata*), способных выдерживать более ксерофитные по сравнению с исходными условия, при этом ранее произраставшие на буграх кустарнички оказались угнетены и выпадали. Однако, в отличие от бугров крупнобугристых болот, где процессы деградации носят более длительный характер, на плоскобугристых болотах реверсивное восстановление встречается значительно реже.

Наиболее выраженными признаками перехода в стадию активного протаивания служат просадки с подтопленными и вымокающими лишайниками. На их месте появляются отдельные пятна *Warnstorfia fluitans*, *W. exannulata*, по периферии бугров развиваются сплавинки из *Spagnum riparium*. Среди талломов отмирающих лишайников можно встретить плодовые тела базидиальных грибов. В такие места обитания начинают внедряться вегетативно подвижные виды пушиц и осок. Особенно активна в олиготрофных условиях *Eriophorum russeolum* – этот вид быстро захватывает опускающиеся участки бугров с



вымокающими лишайниками. Например, полное протаивание небольшого бугра высотой до 50-60 см с уровнем мерзлоты 37 см произошло за 9-летний период. Процесс сопровождался постепенным захватом *Eriophorum russeolum* вытесняющей площади, в течение этого времени плотная кайма из вегетирующих экземпляров смещалась от быстро осевших краев бугра к его центру, оставляя на ранее протаявших сегментах успевшую образоваться дернину из отмерших стеблей пушицы.

На стадии активного протаивания становятся заметны различия в экологических оптимумах кустарничков. Наиболее быстро на исчезновение мерзлоты реагирует *Ledum palustre* – на протаивающих сегментах заметны побурение листьев и дефолиация, погибшие особи этого вида преобладают в местообитаниях с деградировавшей мерзлотой. В то же время отдельные виды кустарничков отвечают на протаивание и заболачивание скорее положительно. По просадкам и склонам деградирующих бугров заметно увеличивается в размерах *Betula nana* (на участках мерзлых бугров ее высота около 30 см; на протаявших участках может достигать до 1 м), появляется и быстро разрастается *Andromeda polifolia*. 12-летние наблюдения за бугром высотой 1,2 м с начальными признаками деградации показали, что оседание значительной части бугра произошло на 6-7 год после внедрения в нижней части склона единичных экземпляров *Andromeda polifolia* и *Eriophorum russeolum*.

Участки плоскобугристых болот с опускающейся кровлей часто отличаются фрагментированностью на кочки с пышно разрастающимися кустарничками и понижения, занятые преимущественно лишайниками с примесью мхов.

При таянии бугров происходит приток высвобождающихся питательных элементов в торфяную почву. Поэтому нередко на участки плоских бугров, находящихся на конечной стадии протаивания, активно внедряются мезотрофные и эвтрофные виды – прежде всего *Eriophorum angustifolium*, а также *Carex rotundata*, *C. paupercula*, *Sphagnum squarrosum*, *S. obtusum*.

Полностью протаявшие участки отличает гибель деревьев и их подроста, лишайников, части кустарничков. На поверхности опустившегося бугра начинается процесс формирования новых растительных группировок, более приспособленных к повышенной влажности почв. В понижениях, ранее занятых мхами рода *Warnstorfia*, поселяются *Sphagnum jensenii*, *S. lindbergii*, *S. balticum*, печеночники. В необводненных местообитаниях происходит разрастание *Sphagnum fuscum*, *S. capillifolium*, образующих основу для новых кочек, на которых чаще всего присутствуют кустарнички, отзывчивые на рост увлажнения и трофности – *Andromeda polifolia*, *Chamaedaphne calyculata*. Увеличением обилия на возрастание питания реагируют и некоторые олиготрофные виды, например, *Drosera rotundifolia*, *Rubus chamaemorus*, быстро разрастаются *Eriophorum russeolum*, *E. angustifolium*, в понижениях начинает поселяться *Eriophorum vaginatum*.

Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 455 с.

Губарьков А.А., Московченко Д.В., Бабкин Е.М., Пожитков Р.Ю., Иваков Г.С. //

Эколого-геокриологический мониторинг природного парка «Нумто». В сб. Современное состояние и перспектива развития сети особо охраняемых природных территорий в промышленно развитых регионах. Екатеринбург, 2022. С. 157-162.

Общее мерзлотоведение / Отв. ред. П.И. Мельников, Н.И. Толстихин. Новосибирск, 1974.

## Pleistocene paleosols in the north of the West Siberian Plain: new source of information for reconstruction and prediction of the environmental evolution

*Sergey Sedov<sup>1,2,3</sup>, Vladimir Sheinkman<sup>2,3,4</sup>*

<sup>1</sup>*National Autonomous University of Mexico, Mexico*

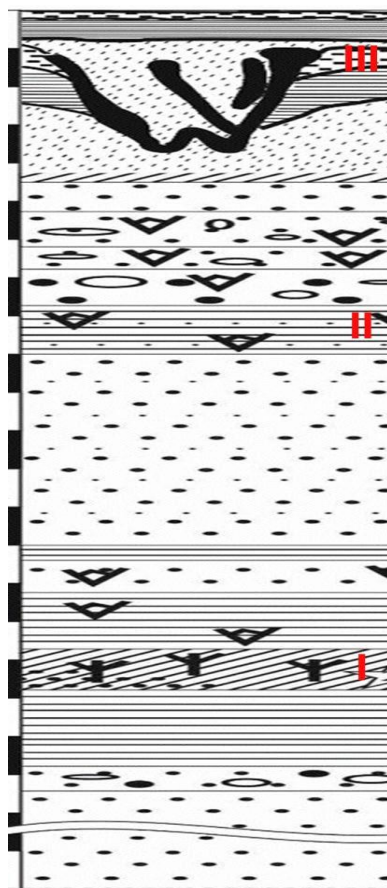
<sup>2</sup>*Tyumen Science Center, SB RAS*

<sup>3</sup>*Tyumen State University, Russia*

<sup>4</sup>*Ben-Gurion University of the Negev, Israel*

*e-mail: serg\_sedov@yahoo.com*

Recent development of non-glacial scenario for the Quaternary landscape evolution of North-Western Siberia [Sheinkman 2016] stimulated search for the paleopedological archives in this region. During the 2013-2018 field surveys we identified and studied 3 major Late Pleistocene pedostratigraphic levels in the sedimentary sequences of the high terraces of the rivers, which run to the north and south from the Siberian Uval. The compound regional pedostratigraphic scheme is presented on Fig. 1.



**Fig. 1** Compound pedostratigraphic scheme for the north of West Siberian Plain.

Main units: I – MIS5 (Kazantsevo) paleosol with clay illuviation, II – MIS3 (Karginian) cryohydromorphic paleosols, III – Late MIS2 (late Sartanian) cryohydromorphic pedosediments filling ice wedge pseudomorphs.

The lowest level identified in the Middle Ob' terrace sections Kiryas and Belaya Gora yielded U/Th dates 100-120 kyr BP and thus is attributed to the MIS-5 – Kazantsevo thermochrone. It is represented by a pedocomplex in which the lower paleosol unit has signs of clay illuviation (indicative of taiga pedogenesis) whereas the upper one consists of the peat and gleyic horizons which suppose cryohydromorphic pedogenesis. Palynological characteristics of this pedocomplex recorded the climate fluctuations during MIS5 from the Picea-Larix taiga environment during

MIS-5e to the establishment of tundra-steppe environment due to the cooling of MIS-5d and/or MIS-5b – that agrees with the paleopedogenetic results. MIS-3 (Karginian) paleosols (with C14 dates from the soil organic materials in the range 25-35 ka BP) lie above the MIS-5 level being separated by the alluvial sediments containing dropstones.

These paleosols demonstrate strong morphological evidence of gleysation and accumulation of plant residues, both processes suppose water logging and reduced environment. We suppose that permafrost was the main factor of hampering percolation and switching redoximorphic processes in the paleosol, which thus was classified as Reductaquic Cryosol.

Presence of permafrost implies colder climate than the present one. Furthermore, neutral reaction, presence of neoformed calcium carbonate and abundance of silt fraction, which points to eolian sedimentation, suggest drier conditions. Paleobiological proxies such as pollen, plant macroremains, phytoliths and fossil insects indicate tundra or tundra-steppe ecosystem (possibly with some forest stands), in good agreement with the paleopedological and sedimentary records.

The paleosol level corresponding to Late Glacial – end of MIS-2 (C14 dates 10-12 ka BP) was identified in the uppermost parts of the high terrace sections of the basins of the rivers Taz and Nadym. This strongly gleyed paleosol is associated with a cryogenic horizon and partly is presented by pedosediments filling large ice wedge casts. We suppose that it is associated with the warming events at the end of the last cryochrome. Paleoenvironmental interpretation of the paleosols agrees with the palinological and paleontological records showing paleovegetation of swampy tundra type.

All Pleistocene soils differ sharply from the recent surface soils that are Podzols, formed in under conditions of perfect soil drainage and no water excess, in agreement with current geological and geomorphological conditions of the Holocene. However paleocryogenic morphostructures inherited from MIS-2 influence Podzol development: the latter shows large pockets both of E and Bf horizons above ice wedge pseudomorphs. Paleosols of MIS-2 are often located close to the surface and comprise the lower part of the recent soil profile.

So, we conclude that revelation of buried palaeosols in the north of the West Siberian Plain and obtaining the data concerning their genesis and development allow us to considerably widen our knowledge in respect to the environmental evolution of that area. We have received an important massive of capacious information, and it can be useful in different researches.

*Sedov S., Rusakov A., Sheinkman V. et al.* MIS3 paleosols in the center-north of Eastern Europe and Western Siberia: Reductomorphic pedogenesis conditioned by permafrost? *CATENA*, 2016. 146: 38–47.

*Sedov S., Sheinkman V., Bezrukova E. et al.* Sartanian (MIS-2) Ice Wedge Pseudomorphs with Hydromorphic Pedodeposits in the North of West Siberia as an Indicator for Paleoenvironmental Reconstruction and Stratigraphic Correlation // *Quaternary International*. 2022; 632:192-205.

*Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh L. et al.* First Results from the Late Pleistocene Paleosols in Northern Western Siberia: Implications for Pedogenesis and Landscape Evolution at the End of MIS-3 // *Quaternary International*. 2016; 418:132-146.

## Sartanian cryopedogenic horizon of West Siberia as a base to model surface processes in cold epochs and to link them with the present

*Vladimir Sheinkman<sup>1,2,3</sup>, Sergey Sedov<sup>2,3,4</sup>*

<sup>1</sup>*Ben-Gurion University of the Negev, Israel*

<sup>2</sup>*Tyumen Science Center, SB RAS*

<sup>3</sup>*Tyumen State University, Russia*

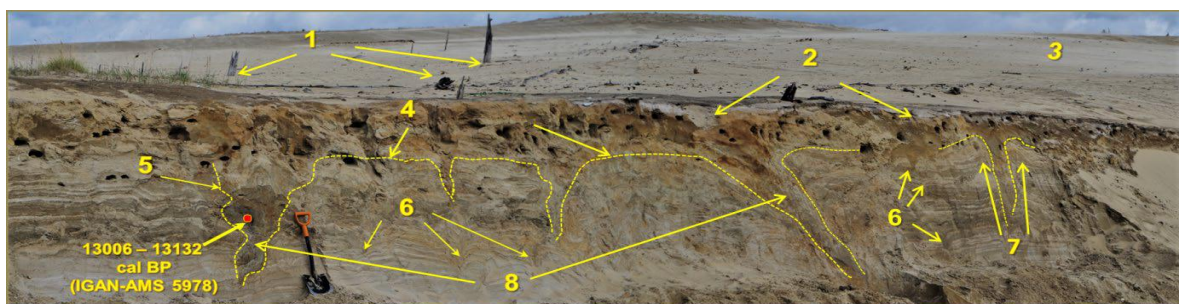
<sup>4</sup>*National Autonomous University of Mexico, Mexico*

*e-mail: vlad.sheinkman@mail.ru*

The present authors offer new data in respect to cryopedogenic processes, regularities of which have been first discovered [Sheinkman et al, 2021] during their study in the north of West Siberia. Interaction between cryopedogenesis and cryogenesis was revealed then as allowing us to form a new paradigm to elucidate development of the noted area in the end of the Pleistocene, and to link it with the Present. This phenomenon can also serve as the reliable indicator to establish similar environments formed at different points of the Quaternary as the revealed cryopedogenic objects are very informative and become especially important for the environmental reconstruction of the Last Pleistocene cold time corresponding to the Marine Isotope Stage 2 (MIS-2) or to the Sartanian time – in the Siberian terminology.

In recent decades, ice sheet presence formerly supposed in that time in West Siberia was rejected; the present authors explained its absence in cold epochs and, as well, unreality at this area of extremely cryoarid conditions like to the Antarctic deserts [Sheinkman et al., 2020]. It is important as researchers supposing such scenarios did not undertake attempts to find palaeosols here, because they could not exist under those conditions.

Remarkably, the revealed cryohydromorphic soils formed in a relatively warmer time in the terminal phase of the Pleistocene (in the end of MIS-2) on the base of the seasonally thawed layer (STL) as the conjugated with the frames of polygonal ice wedge (PIW) pseudomorphs formed also during that phase [Sedov et al., 2022]. The specific Sartanian cryopedogenic horizon had to be generated then, and it may be a marker of corresponding events. Let us consider its development by use of representative sections in the Nadym River valley, on its left-hand bank, where it meets the Khegyiyakha River. There is a quarry with a wide range of paleocryogenic, pedogenic, and postcryogenic formations here (Fig. 1).



**Fig. 1.** Stripping quarry wall on the left-hand bank of the Nadym River near the mouth of the Khegyiyakha River (photo by V.S. Sheinkman). *Legend:* 1 – remains of a burnt forest, 2 – modern Podzol, 3 – sand dune, 4 – base of the relic cryohydromorphic soil, 5 – polygonal ice wedge pseudomorph outlines, 6 – buried initially ground wedges, 7 – traces of layers being squeezed, 8 – polygonal ice wedge pseudomorphs.

The quarry exposes the body of the second, above the floodplain, terrace formed in MIS-3, while being dissected by PIWs during MIS-2 [Sedov et al., 2022]. The terrace is covered by an active dune, nevertheless its foremost feature is the forming the cryohydromorphic buried soils with a basis on the bottom of the former STL conjugated with the framing of the PIW pseudomorphs. The relics of the soils were clearly noticeable as a bluish, several centimeters thick horizon, with a brown border below with few dark humic morphons. The development of these soils is reflected on the

matrix of permafrost rocks, where the freezing deposits would stabilize, switching from the process of floodplain accumulation to the state of a stable terrace. The Pseudomorphs are of a distinguished triangle shape, narrow in their middle and bottom, wider at the top, squeezed upwards and outwards where they touch the surrounding sediment rock, with the slightly smoothed ridges above the heads of the veins. This is a typical image of the PIW development under the stabilization of the day surface they cut through. It also implies their epigenetic nature. Cryohydromorphic soils that are partially overprinted by the illuvial horizon of the surface Podzol above can be clearly seen in the filling of the pseudomorphs in the form of buried pedosediments that slid down from the space between the wedges, together with the sedimentary rocks, along the walls of thawing PIWs. This explains the well-pronounced subvertical streaks in the structure of the pseudomorphs. The outlines of the precursors of the pseudomorphs along these structures are preserved even better and have a more pronounced streaky structure.  $^{14}\text{C}$ -dating of the dark humus morphons incorporated into the fill of the pseudomorphs showed that they began to fill during the terminal phase of the Pleistocene, 15-16 thousand years ago, during an early manifestation of climate warming at the end of the MIS-2 cryochron, but with the permafrost still present. When the temperatures become higher, but remained negative in the permafrost, the ice substance of polygonal wedges and sand-ice wedges began to thaw, allowing the fragments of cryohydromorphic soil and sedimentary rock to slide down the walls of the wedge and freeze along them, layer by layer.

Lesser wedges locate at different depths much closer to each other. The bottom layers of their surrounding rock curl downwards, gentle at the top and then smoothly merging with the horizontal deposits above. These are initially ground wedges (IGW) forming in the active layer. They indicate that the MIS-3 deposits were frozen, while the temperature was higher than the level required for the development of PIWs, and therefore the deposits accumulated under conditions of an unstabilized terrace surface, turning into syncryogenic formations. By the moment the cryohydromorphic soil started to form during MIS-2, the surface of this sedimentary body had already stabilized (otherwise the soil would not have formed) and acquired some epigenetic formations of PIWs that cut through and thawed at the end of MIS-2 to be replaced by pedodeposits, or the derivatives of cryohydromorphic soil.

By the Middle Holocene a significant part of the frozen mass thawed, as evidenced by well-pronounced Podzols in its top part: they request development under conditions of good aeration and free drainage, which means that they were formed only after the sedimentary rocks had almost thawed and the former permafrost aquiclude had disappeared, fixed by the base of cryohydromorphic buried soils before that.  $^{14}\text{C}$  dating by the substance of the Podzols proves that it happened in the Middle Holocene, whereas the Podzols continue to develop at present and span a larger area advancing to the north.

The results of our research explore the events of MIS-3 – MIS-1. However, since the depth and volume of the main cryochrons and thermochrons on the paleoclimatic scales of the Quaternary were similar, and since they were approximately the same during MIS-1 – MIS-6, then our results can be used as a reference basis for assessing the events of the entire Quaternary, whereas the objects of the research are cryopedogenic phenomena.

*Sheinkman V.S., Melnikov V.P., Sedov S.N. et al. Results of Cryotrasologic Indication of Paleosols Revealed to the North of the European and Western Siberian Loess Belt // Doklady RAS. Earth Sciences, 2019, 487 (1): 858– 861.*

*Sheinkman V.S., Melnikov V.P., Parnachev V.P.. Analysis of cryogenic and tectonic processes in the north of West Siberia in the Pleistocene from the standpoint of cryoheterotopy // Doklady RAS. Earth Sciences, 2020; 494(1): 82-86.*

*Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh L. et al. A Multiproxy Record of Sedimentation, Pedogenesis, and Environmental History in the North of West Siberia during the Late Pleistocene Based on the Belaya Gora Section // Quaternary Research. 2021. 99: 204-222.*

### СЕКЦИЯ 3.

## ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОГЕННЫХ ПОЧВАХ

### Возраст и микроэлементный состав молодых почв на массивах литальза в долине реки Сенца, Восточный Саян

*Васильчук Дж.Ю., Васильчук Ю.К.*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*e-mail: jessica.vasilchuk@gmail.com*

В зонах прерывистого и островного распространения многолетнемерзлых пород литальза являются одним из интересных криосферных объектов. Литальза являются аналогами пальза без мощного (>50 см) торфяного горизонта на поверхности [Pissart, 2002]. Объекты исследования – почвы сформированные на литальза в долине р. Сенца на территории Окинской котловины. Согласно ландшафтной карте [Выркин и др., 2012], территория исследования представлена ландшафтами склоновыми лиственничными разнотравными с примесью березы на дерновоподбурах и ландшафтами днищ котловин луговыми заболоченными на аллювиальных перегнойно-глеевых и торфяно-(минерально)-глеевых почвах.

С целью изучения почвенного покрова была проведена почвенная съемка четырех бугров пучения и межбугорного понижения, измерен радиоуглеродный возраст органического материала почв [Vasil'chuk et al., 2019], содержание углерода и азота [Васильчук и др., 2020], а также содержание микроэлементов в почвах. Бугры А, В, С (рис. 1 А, В, С) располагаются на левом берегу р.Сенца, а бугор D в 1 км выше по течению на правом берегу (рис. 1 D).



**Рис. 1.** Бугры пучения в долине р.Сенца. Буквенные обозначения бугров на рисунке (А– D – полевая нумерация бугров), соответствуют обозначениям в тексте

Почвенный покров бугров пучения в основном представлен почвами отдела альфегумусовых почв [Классификация и диагностика почв России, 2004] – подбуры иллювиально-гумусовые и дерново-подбуры, в межбугрном понижении, периодически заливаемом паводковыми водами, наиболее распространены почвы отдела глеевых и криогенных почв – торфяно-глееземы и торфяно-криоземы. На поймах формируются аллювиальные гумусовые и аллювиальные торфяно-глеевые почвы. Особенность почв на вершинах и склонах бугров – наличие погребенных линз торфа в почвенных профилях. На современном этапе поверхность бугров не заливается паводковыми водами, линзы торфа – это остаточное явление, возникшее в результате процесса пучения и маркирующее возраст начала формирования литальза. Согласно данным радиоуглеродного датирования, литальза А формировался последние 300-350 лет, литальза В начал формироваться около 540 лет назад, а литальза С позднее 400 лет назад, литальза D – самый молодой бугор, сформированный около 170 лет назад [Vasil'chuk et al., 2019]. Подстильно-торфяные и гумусовые горизонты подбуров характеризуются средним содержанием N 0,83% и содержанием С 6,86%. Линзы погребенного торфа отличаются повышенными содержаниями N и С: 1,31% и 12,68%. В иллювиальных горизонтах отмечено пониженное содержание азота (0,54%), высокое содержание углерода в горизонтах ВН и ВНФ (9,49%) связано, вероятно, с альфегумусовым процессом [Васильчук и др., 2020]. В почвах, сформированных на литальза, относительно кларка верхней части континентальной земной коры [Rudnick, Gao, 2003] концентрируются Cd, Zn, Mo, V, Bi; содержание других элементов ниже, либо на уровне кларка литосферы. Максимумы содержания Cd и Zn в подбурах приурочены к линзам торфа.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (номер гранта РФФ 23-17-00082).

*Васильчук А.К., Васильчук Д.Ю., Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К., Терская Е.В., Кречетов П.П., Блудушкина Л.Б.* Соотношение содержания углерода и азота в почвах литальза-ландшафтов в долине р. Сенца, Восточный Саян // Арктика и Антарктика. 2020. № 1. С. 75–97. doi: 10.7256/2453-8922.2020.1.32245.

*Выркин В.Б., Шеховцов А.И., Белозерцева И.А., Алёшина И.Н., Захаров В.В., Кичигина Н.В., Черкашина А.А.* Современное состояние ландшафтов Окинской котловины (Восточный Саян) // География и природные ресурсы. 2012. №4: С. 98–107.

*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.

*Pissart A.* Palsas, lithalsas and remnants of these periglacial mounds. A progress report // Progress in Physical Geogr. 2002. Vol. 26(4). P. 605–621 doi: 10.1191/0309133302pp354ra *Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust // Treatise on geochemistry.

Vol. 3. Elsevier Science, 2003. P. 1-64. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.

*Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk J.Yu., Alexeyev S.V., Budantseva N.A., Alexeyeva L.P., Vasil'chuk A.C., Kozyreva Ye.A., Svetlakov A.A.* The Cyclical Structure of the Isotopic Diagram of a Lithalsa and Its Radiocarbon Age, Sentsa River Valley, Eastern Sayan // Doklady Earth Sci., 2019, Vol. 489(2). P. 1456–1460. doi: 10.1134/S1028334X19120158.

## Исследование осажденных карбонатов в циклическом промерзании

*Васина А.И.<sup>1</sup>, Брушков А.В.<sup>1</sup>, Бронникова М.А.<sup>2</sup>, Коноплянникова Ю.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт географии РАН, Москва, Россия*

*e-mail: aivasina97@mail.ru*

Образование той или иной формы кристаллов исторически объяснялось особенностями внутренней кристаллической структуры [Шафрановский, 1981]. Однако экспериментальные работы и наблюдения в природе показали, что существенное влияние на форму оказывают среда и условия (кинетика) кристаллизации [Иванов, 2012].

Карбонатные пленки, о которых далее пойдет речь, образуются в самых разнообразных условиях: в засушливом и полузасушливом континентальном климате от субтропиков до полярных регионов. Последовательность слоев кутан, отличающихся по морфологии и составу, можно рассматривать как архив изменений окружающей среды и определенных процессов. Криогенный механизм – кристаллизация в перенасыщение при замораживании растворов является одним из возможных механизмов образования кальцита в почвах и рыхлых отложениях [Zamanian, 2016]. Возможность криогенного образования кальцита широко обсуждается в литературе, но пока не было воспроизведено экспериментально ни в лабораторном, ни в полевом эксперименте.

В настоящее время в литературе можно найти ряд закономерностей, где рассматривается связь размера кристаллов карбоната и их условий осаждения, также выявляется роль примесей в формировании кристаллов для определенных форм, данная информация все еще является противоречивой [Wright et al., 1991]. В некоторых работах рассматривается корреляция формы кальцита в карбонатных кутанах с климатом [Chadwick, 1989].

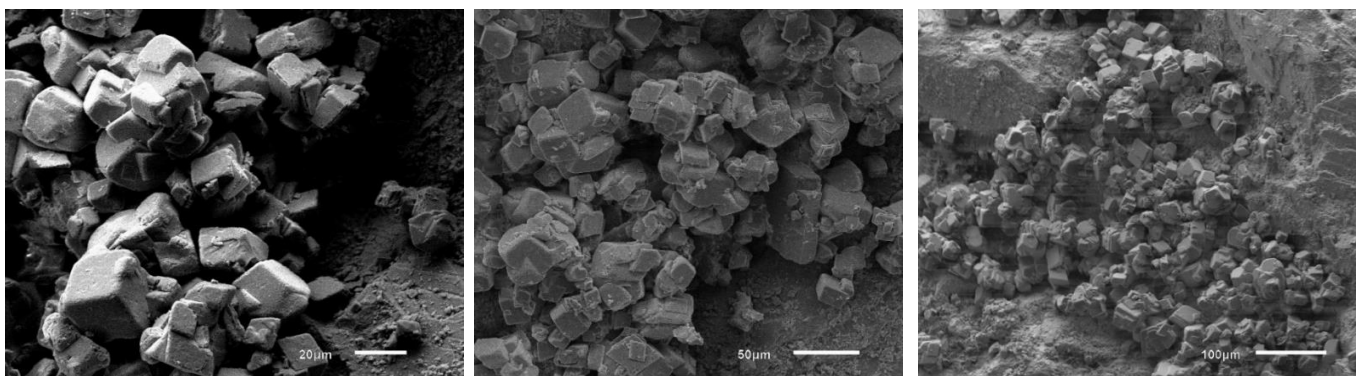
Проблемы скоростей криогенного формирования кристаллов карбонатов в сезонноталом слое, связи формы и размера кристаллов и внутренней морфологии карбонатных аккумуляций с условиями промерзания, в частности, с температурным режимом, в литературных данных освещены слабо. В связи с этим возникает ряд вопросов для исследования: изучить, как быстро происходит криогенная аккумуляция кальцита (сколько циклов промерзания-оттаивания необходимо для формирования видимых накоплений), как влияет скорость промерзания, начальная концентрация и объемы карбонатного раствора на формы и размеры минералов, которые образуются, на распределение кристаллов в матричном материале. Исследования морфологии кристаллов кальцита и карбонатных аккумуляций, полученных в ходе прямого лабораторного эксперимента и их сравнительный анализ с природными аккумуляциями кальцита в почвах и отложениях криолитозоны позволит идентифицировать криогенные формы карбонатов в природных объектах и оценить роль криогенных процессов в накоплении кальцита в сезонноталом слое.

Автором проводится работа, целью которой является выявление закономерностей криогенного формирования кальцита, идентификация его криогенных форм и роли криогенеза в аккумуляции карбонатов в сезонноталом слое почв и отложений криолитозоны. На данном этапе выполнения лабораторного эксперимента по накоплению кальцита в циклическом промерзании было проведено 10 циклов промораживания и оттаивания насыщенного раствора карбоната кальция с использованием субстрата разного размера (галечки 1-2 см, пески, глины), состава (кварц, кальцит, ПШ и пр.), и разным типом поверхности (гладкие, шероховатые). Промораживание проводилось при температуре -4°C, сушка – при комнатной температуре.

В результате экспериментального исследования были получены первичные данные о морфологии кальцита. Образцы изучены на микроуровне под бинокулярном и



субмикрорурне с помощью электронного сканирующего микроскопа. Ниже (рис. 1) приведены фотографии образованных кристаллов размером от первых микрон до 60 мкм.



**Рис. 1.** Характерные формы кристаллов кальцита, полученные при промораживании насыщенного карбонатного раствора.

Нужно отметить, что по большей части формы карбоната представлены в виде кубов и ромбоэдров, также встречаются таблитчатые кристаллы и иные агрегаты. В целом кальцит находится в сростках, реже его можно увидеть в виде отдельных кристаллов. Также видно, что некоторые из них имеют «зализанные» ребра и углы, вероятно, это связано с растворением  $\text{CaCO}_3$ , то есть, он образовался во время проведения первых циклов, раньше, чем кальцит с четкими гранями и острыми углами.

В дальнейшем эксперимент планируется продолжаться с целью накопления кальцита, более детального изучения морфологии, а также для определения скорости накопления карбоната при разной температуре промерзания и количестве насыщенного карбонатного раствора.

*Иванов О.К.* Зависимость формы кристаллов от условий кристаллизации 2012, с. 119-121.

*Шафрановский И.И.* Некоторые замечания по поводу проблемы генетической интерпретации формы кристаллов // ЗВМО, 1981. Вып.1. С.119 – 124.

*Chadwick O.A., Sowers J.M., Amundson R.G.* Morphology of calcite crystals 1989. V. 53. № P. 211-219.

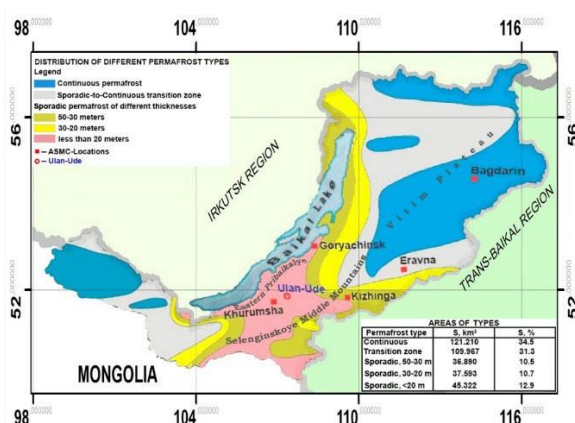
*Wright V.P., Tucker M.E.* Calcretes: an introduction. // Calcretes. Oxford: Blackwell Scientific. 1991. P. 1–22.

*Zamanian K., Pustovoytov K., Kuzyakov Y.* Pedogenic carbonates: Forms and formation processes // Earth-Science Reviews. 2016. V. 157. – P. 1-17.

## О температурных режимах почв Западного Забайкалья на южной границе криолитозоны

*Гончиков Б.М. Н., Бадмаев Н.Б., Куликов А.И., Мангатаев А.Ц.*  
 Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия  
 e-mail: batomunk74@mail.ru

В современную эпоху на территории Западного Забайкалья многолетняя мерзлота распространена повсеместно, с переходом в островную форму к югу. Морфология и температурные условия криолитозоны зависят от конкретных условий рельефа как основного перераспределителя тепла и влаги.



**Рис. 1.** Карта распространения типов многолетней мерзлоты и схема расположения атмосферно-почвенных измерительных комплексов (АПИК).

Почвы на полигоне «Багдарин» (рис.1.) развиваются под разнотравно-луговыми ассоциациями. Чередование горизонтов можно обозначить следующей последовательностью индексов: А0-АУ-CRMg-C. Почва, согласно Полевому определителю почв России, относится к типу лерново-криометаморфических глееватых мерзлотных.

Почвы на полигоне «Еравна» развиваются в полугидроморфных условиях. Морфологическое строение профиля имеет следующие генетические горизонты: АU – АUBI – ВI – ВСА – Q – СQ. По полевому определителю почвы относится к типу чернозем глинисто-иллювиальный квазиглеевый мерзлотный.

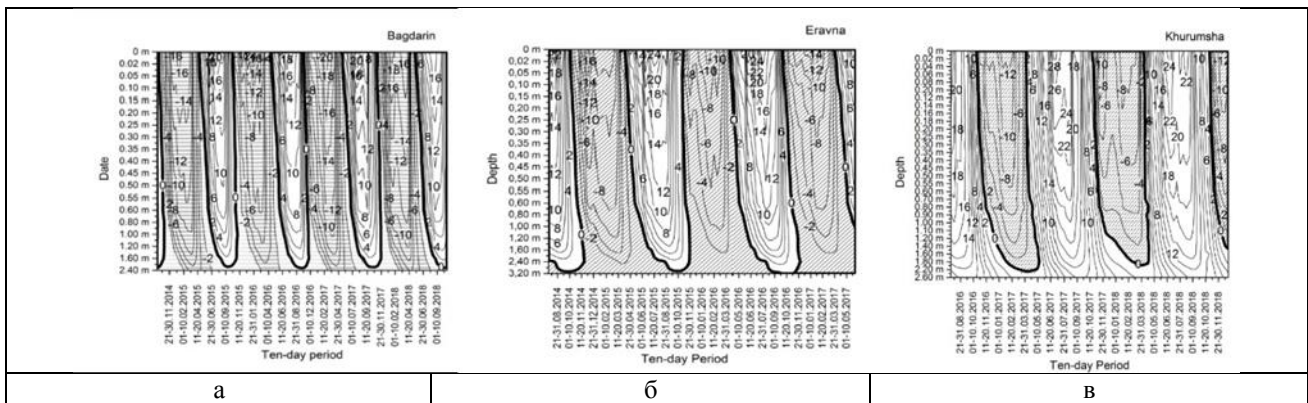
Почвы полигона «Хурумша» формируются под степной растительностью на неглубоко залегающих кристаллических породах. Описанные почвы имеют морфологическое строение профиля (О-АК-Rca-R) и относятся к типу Литоземы криогумусовые.

Анализ полученных данных на полигонах показывает пространственно-временную изменчивость температуры почв от поверхности до глубины 3,2 м (рис. 2). Температурный режим мерзлотных дерново-криометаморфических глееватых и мерзлотных черноземов глинисто-иллювиальных квазиглеевых Витимского плоскогорья относятся к мерзлотному типу, а в литоземах криогумусовых полигон «Хурумша» – к длительно сезоннопромерзающему типу. Результаты протаивания и промерзания почв приведем на примере полигонов АПИК.



Количество дней на промерзание дерново-криометаморфических глееватых почв по всему профилю в «Багдарине» составило в среднем 24 дня со скоростью промерзания 10,5 см/дн., что на 39, и 117 дня короче, чем в «Еравне» и «Хурумше», скорость которых составила 5,6 см/дн. и 1,4 см/дн, соответственно.

Процесс протаивания по всему профилю происходит быстрее в литоземах криогумусовых «Хурумша» и длится в среднем 31 день со скоростью 6,9 см/дн. Это на 71 и

87 дней короче, чем на полигонах «Багдарин», «Еравна», а скорость протаивания которых составляет 1,6 см/дн. и 2,0 см/дн. соответственно.



**Рис. 2.** Температурные режимы процессов промерзания и протаивания почв:

а – дерново-криометаморфических глееватых мерзлотных; б – черноземов глинисто-иллювиальных квазиглеевых мерзлотных; в – литоземов криогумусовых;  – мерзлый слой,  – сезонно-талый слой.

Процесс промерзания мерзлотных почв на полигоне «Багдарин» центральной части Витимского плоскогорья начинается в конце сентября-начале октября, что на 11 дней раньше, чем в почвах полигона «Хурумша» соответственно. В мерзлотных типах промерзание заканчивается слиянием в конце октября и в начале ноября со сплошной мерзлотой на глубине 2,0 м в «Багдарине».

Процесс протаивания мерзлотных дерново-криометаморфических почв полигона «Багдарин» начинается в конце апреля. Начало промерзания обычно совпадают с первыми заморозками в октябре месяце. Так заканчивается полный цикл промерзания и протаивания мерзлотных дерново-криометаморфических почв.

Процесс протаивания по всему профилю происходит быстрее в литоземах криогумусовых полигона «Хурумша» и длится 16 дней со скоростью протаивания 10,0 см/дн. Это на 82 дня меньше, чем на полигоне «Багдарин», скорость протаивания, которых составляет 1,6 см/дн. Длительно сезоннопромерзающие типы почв за период наблюдений, в мерзлом состоянии были только 5,5-6 месяцев, оставаясь в подошве породы большую часть года в талом состоянии. Тогда как в мерзлотных типах почв картина принципиально другая. Здесь мерзлотные почвы сезонно 4,5–5 месяцев только протаивают летом, оставаясь в подошве (породах) мерзлыми большей части годового цикла.

Закономерности проникновения и распределения положительных температур выше 0°C на глубине 100 см. Так, в литоземах криогумусовых Селенгинского среднегорья данный показатель составляет 220 дней, что на 94 дня превышают продолжительность температур в почвах полигона «Багдарин».

Наибольшие различия выявлены в продолжительности температур больше 5°C на глубине 1 м, 178 дней в литоземах криогумусовых, что на 135 и 88 дней больше, чем в «Багдарине» и «Еравне». Продолжительность дней с температурой больше 10°C на глубине 20 см составляет 145 дней в «Хурумше», что на 69 и 45 дней больше, чем в «Багдарине» и «Еравне» соответственно.

Таким образом, скорость промерзания и продолжительность дней с отрицательными температурами выше в лесолуговых и лугово-степных супесчано-суглинистых мерзлотных почвах Витимского плоскогорья. Данные процессы связаны с ранним приходом холода, более влажным состоянием почв и близким залеганием мерзлоты. На степных супесчаных холодных почвах Селенгинского среднегорья – наоборот, процесс протаивания начинается уже в конце марта-начало апреля, что почти на 10-20 дней ранее, чем в почвах Витимского плоскогорья.

## Мониторинг температурного режима почв и многолетнемерзлых пород Магаданской области

*Землянкова А.А.<sup>1,2</sup>, Макарьева О.М.<sup>1,2</sup>, Абрамов Д.А.<sup>3</sup>,  
Осташов А.А.<sup>2,4</sup>, Нестерова Н.В.<sup>2,4</sup>*

<sup>1</sup>Северо-Восточный государственный университет, Магадан, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: a.zemlyanskova@spbu.ru, anastasiazemlanskova@gmail.com

Одним из стратегически важных регионов в зоне многолетнемерзлых грунтов (98% территории) является Магаданская область, где происходит активная добыча рассыпного золота. Фоновый мониторинг температуры грунтов на этой территории ведется на единственной станции Сусуман (вытяжные термометры до глубины 3.2 м), что недостаточно для качественного обеспечения информацией об изменении геокриологических условий.

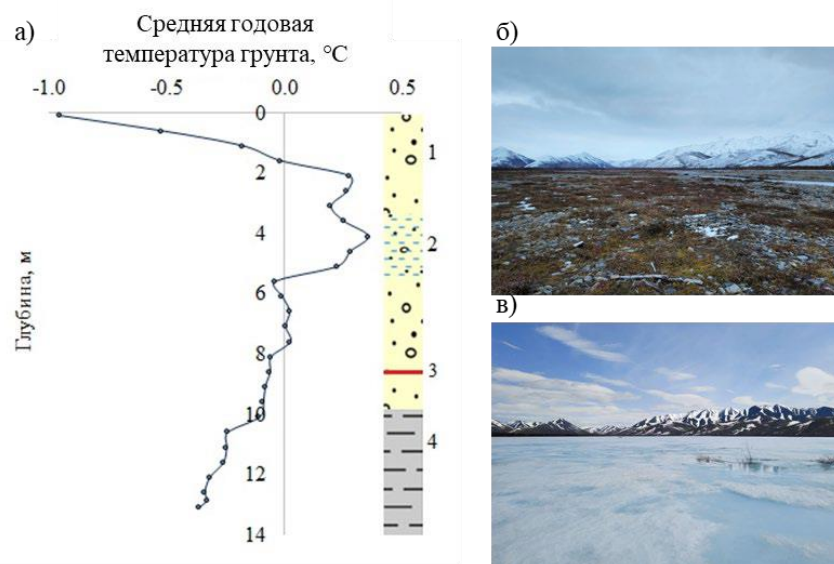
В 2021–2022 гг. в рамках проекта Санкт-Петербургского государственного университета на территории Магаданской области были пробурены и оборудованы термокосами (до 38 датчиков по длине косы) 10 скважин глубиной 15 м в различных горных ландшафтах [Абрамов и др., 2022]. В данной работе представлен анализ данных 4-х скважин, расположенных в бассейне р. Анмангында. Рассматриваемая территория относится к Верхоянско-Колымской горноскладчатой области. В геологическом строении района участвуют породы пермского, юрского и триасового возраста [Геологическая карта, 1968]. Мощность многолетнемерзлых пород достигает 300 м, в долинах рек сокращается до 80–100 м, прерывается в таликовых зонах. В бассейне р. Анмангында формируется гигантская наледь подземных вод, площадь наледной поляны которой составляет 7.6 км<sup>2</sup> – 2% от площади речного бассейна, которым она питается. Климат района исследования суровый, средняя годовая температура воздуха, по данным м/с Усть-Омчуг (1967–2022), –9.8°C. Высота снежного покрова составляет 26–31 см, на склонах может достигать более 1 м. Период с температурой воздуха ниже нуля градусов длится с октября по апрель.

Мониторинг температуры почв и грунтов осуществлялся с помощью термокосы и логгера с автоматической записью данных раз в 4 часа (производство компании «Импеданс»). Точность измерений составляет от 0.2 до 0.1°C. Наблюдение за снежным покровом с октября 2022 г. ведется с помощью системы фотопост (рейка + фотоловушка), а также осуществляются контрольные измерения, в том числе плотности снега. Информация о температуре воздуха получена по м/с Усть-Омчуг (30–50 км от скважин), а также по автоматическим станциям, установленных авторами. Рассчитаны средние суточные, средние месячные и годовые значения температуры почв в профиле от 0 до 15 м (в зависимости от глубины скважины), определена мощность деятельного слоя, кровля многолетнемерзлых пород.

Многолетняя мерзлота региона исследований относится к высокотемпературной –1.8...–3.2°C, на наледной поляне –0.1°C. По данным м/с Усть-Омчуг, переход среднесуточной температуры воздуха через ноль в сторону отрицательных значений наблюдается в конце сентября. В это же время происходит промерзание почвы, как с поверхностного слоя, так и с кровли мерзлоты на скважинах ГП-2 и Сопка. На этих участках находится сливающийся тип мерзлой толщи. Оттаивание длится с мая (июня) по сентябрь до глубины 0.75 м (1.25 м) на ГП-2 (Сопке). Средняя годовая температура пород на глубине нулевых годовых оборотов составила –3.2°C (13 м) на Сопке и –1.8°C (11.5 м) на ГП-2. Различия температурного режима определяются подстилающей поверхностью (растительность, динамика снежного покрова). В зоне развития наледи (рис. 1) промерзание грунта с поверхности отмечается до глубины 3.6 м, а с кровли мерзлоты (находится на глубине 8.5 м) до 5.6 м, в слое 3.6–5.6 м находится канал фильтрации подземных вод.

Оттаивание происходит после разрушения наледи до глубины 8 м. Скважина «Солонцовый» находится в 50 м от русла ручья Солонцовый (правый приток р. Анмангында), здесь образуется таликовая ванна. Максимальная мощность промерзания над таликом в мае составила 2.6 м. После схода снежного покрова происходит активный прогрев почвы и водоносного горизонта.

Оборудование сети наблюдательных термометрических скважин позволило получить актуальные сведения о геокриологических условиях континентальной части Магаданской области.



**Рис. 1.** а) Геокриологическая колонка по скважине «Наледь».

1 – аллювиальные отложения; 2 – обводнение; 3 – кровля многолетнемёрзлых пород; 4 – сланцы;  
б и в) наледная поляна Анмангындинской наледи осенью 2021 г. и весной 2022 г. соответственно.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Оборудование установлено в рамках НИР СПбГУ № 94034170, анализ данных проведен в рамках проекта РФФИ № 23-17-20011.

*Абрамов Д.А., Макарьева О.М., Землянскова А.А., Остахов А.А., Нестерова Н.В.* Развитие сети геокриологического мониторинга Магаданской области: первые результаты 2021-2022 гг. // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 23–25 ноября 2022 г. С. 119-126.

Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Верхне-Колымская. Лист Р-55- XXX. Объяснительная записка. М.: Недра, 1968. 67 с.

**Полициклические ароматические углеводороды  
в почвах горных тундр Полярного Урала  
(на примере северной части хребта Большой Пайпудынский)**

*Королёв М.А., Шамрикова Е.В., Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Жангуров Е.В., Панюков А.Н.  
Институт биологии Коми научного центра Уральского РАН, Сыктывкар, Россия  
e-mail: mihailkorolev1997@gmail.com*

Район исследований находится в южной части циркумполярной зоны и охватывает горную ландшафтную зону Полярного Урала. На территории широко развиты выходы на дневную поверхность массивных мраморизованных известняков нижнедевонского возраста. Климат района – гумидный континентальный, характерны резкие колебания сезонных и суточных температур. Многолетнемерзлые породы имеют преимущественно островное распространение. В качестве объектов исследований выбраны почвы полутораклометровой катены в северной части хребта Большой Пайпудынский. Участки расположены на высотном профиле от коренного берега ручья Развильный (участок (уч.) 1, координаты: 67°13' 28.7" N; 65° 28' 39.8" E) до плато в верхней части склона (уч. 8; 67° 13' 33.3" N; 65° 38' 04.8" E).

Растительные сообщества выбранных участков существенно различаются по составу, структуре и функциональным характеристикам [Шамрикова и др., 2020]. По запасам наземной биомассы растительных сообществ выделены группы. Первую составляют высокотравный луг (уч. 7) и кустарничково-дриадово-моховая тундра (уч. 8) – около 1600 г/м<sup>2</sup>. Вторая группа объединяет растительные сообщества уч. 1-6, у которых запасы наземной биомассы составляют менее 200 г/м<sup>2</sup>. Участок 6 имеет криогенно-пятнистый характер микрорельефа с зонами (уч. 6, пятно), не покрытыми растительностью. Оголенные пятна-медальоны имеют 4-5-6-угольную геометрическую форму и составляют 65-70 % от общей площади поверхности.

В морфологическом строении разреза уч. 6 на глубине 2-35 см диагностированы включения послепожарных древесных углей разного размера. Внутрипрофильное распределение углистых частиц свидетельствует о локальном и достаточно мощном типе пожара. Последующие эрозионные процессы привели к миграции углистых частиц ниже по склону. Наиболее ярким примером этого является наличие погребенных горизонтов с большим количеством углей в средней части профиля в разрезах уч. 4 и 5.

Во всех исследуемых объектах выявлено присутствие 14 структур полициклических ароматических углеводородов (ПАУ): нафталин, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз(а)антрацен, бензо(б)флуорантен, бензо(к)флуорантен, бенз(а)пирен, бенз(ghi)перилен, дибенз(а,h)антрацен. Аценафтен обнаружен только в пробах угля. Содержание ПАУ в наземной биомассе растений участков колеблется в диапазоне 35-110, в почвах – 6-190, угля – 770 мкг/кг.

В составе ПАУ биомассы доминируют легкие структуры. На большинстве участков их вклад в общую сумму ПАУ равен 97-100 %. Исключение составляет состав биомассы уч. 2, где доля легких ПАУ снижается до 80 %.

Изученным профилям, кроме почвы пятна уч. 6, характерна аккумуляция ПАУ в органогенных горизонтах. Во всех почвах так же, как и в растениях, доминируют легкие ПАУ, главным образом нафталин и фенантрен.

Выявлено 2-4 кратное превышение содержания ПАУ в органогенных горизонтах почв под растительностью по сравнению с почвами оголенных пятен уч. 1 и 6. Максимальным содержанием ПАУ отличаются почвы второго и седьмого участков.

Наличие фрагментарного погребенного горизонта с углями на глубине 5-15 см в почве уч. 5, заложенной в транзитно-аккумулятивных условиях ландшафта, указывает на аллохтонную природу послепожарных углей, перемещенных от эпицентра горения (уч. 6). В процессе длительного переотложения в ходе плоскостного смыва водными потоками, возможно, произошла трансформация почвообразующего материала, способствующая

надежному «капсулированию» ПАУ, содержащихся в угольных частицах. На химическую устойчивость ПАУ, находящихся в почве в течение длительного времени в связи с их адсорбцией органическим веществом почвы, указывалось ранее [Smitha et al, 2011].

Значительное воздействие на содержание ПАУ в почвах оказывает наземная биомасса. Это подтверждает подобие качественного состава и тесная связь содержания индивидуальных ПАУ органогенных горизонтов и биомассы соответствующих участков  $R^2 = 0.79-0.97$ , которая последовательно снижается с глубиной в нижележащей толще  $R^2 = 0.57-0.87$ .

Распределение ПАУ в почвах также связано с течением криогенных процессов. Содержание полиаренов в верхних горизонтах почв криогенных пятен кратно ниже по сравнению с почвами соответствующих участков под растительностью. Этот факт связан как с отсутствием дополнительного поступления ПАУ из растений, так и с процессами выветривания, которым в большей степени подвергались криогенные пятна. Мерзлотные явления, вызванные максимальным промерзанием почв на вершине увала, определяют инверсию распределения ПАУ в профиле с наибольшим их содержанием в нижних горизонтах почвенного разреза.

Следует обратить внимание на то, что тяжелые ПАУ обладают канцерогенным действием. Особую токсичность и мутагенное действие имеет бенз(а)пирен, отнесенный в Российской Федерации к I (высшему) классу опасности. Предельное значение концентраций (ПДК) бенз(а)перина в почвах составляет 20 мкг/кг. Следует отметить, что в биомассе и отдельных горизонтах почвы уч. 2 содержание данного канцерогена существенно (до 6.3 мкг/кг). Биоаккумуляция органических токсикантов в системе «почва-растение-животное» – риск для функционирования базовой отрасли традиционного сектора агропромышленного комплекса Крайнего Севера. Согласно российскому регламенту, содержание бенз(а)пирена в мясе и мясосодержащих продуктах не должно превышать 1 мкг/кг.

Требуется регулярный мониторинг накопления ПАУ в почвах, растительной продукции территории для контроля их возможного поступления по пищевым цепям в организм животных и человека. В дальнейшем планируется изучить состав мышечных тканей оленей на содержание ПАУ.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена в рамках бюджетной темы НИР № 122040600023-8.

*Шамрикова Е.В., Жангуров Е.В., Кулюгина Е.Е., Королёв М.А., Кубик О.С., Туманова Е.А.* Почвы и почвенные покровы горно-тундровых ландшафтов Полярного Урала на карбонатных породах: разнообразие, классификация, распределение углерода и азота // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1053-1070.

*Smitha, M.J.; Flowersa, T.H.; Duncana, H.J.; Saitob, H.* Study of PAH dissipation and phytoremediation in soils: Comparing freshly spiked with weathered soil from a former coking works. J. Hazard. Mater. 2011, Vol. 192, pp. 1219–1225, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.06.033.

## Химическая характеристика криоконитов и приледниковых почв на примере ледников Малый Азау и Гарабаши (Приэльбрусье, Центральный Кавказ)

*Кушинов И.Д.<sup>1</sup>, Темботов Р.Х.<sup>1,2</sup>, Низамутдинов Т.И.<sup>1</sup>, Абакумов Е.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН, Нальчик, Россия*

*e-mail: st084838@student.spbu.ru*

Проблема дегляциации полярных и горных территорий стала особенно актуальной в последние годы в связи с глобальным изменением климата. Одной из причин деградации ледников является наличие криоконитов – темноокрашенных органо-минеральных отложений на поверхности ледников. Криокониты могут влиять на цикл углерода в горных районах и ускорять развитие перигляциальных почв за счет переноса элементов питания с поверхности ледника и колонизации новоотложенных почвообразующих пород растениями и микроорганизмами, а также увеличивать уровень загрязнения приледниковых почв. Таким образом, важно изучить химические и биохимические свойства криоконитов, а также оценить их влияние на перигляциальные почвы.

Образцы были отобраны во время полевой экспедиции в Приэльбрусье (Кабардино-Балкарская республика, Россия) в 2022 году. Криокониты были отобраны с ледников Малый Азау и Гарабаши, расположенных на южном и юго-восточном склонах горы Эльбрус. Образцы перегнойных, темно-гумусовых органо-аккумулятивных на моренных отложениях и торфяных эутрофных почв [Классификация..., 2004] были отобраны в ущелье Терскол, прилегающем к горе Эльбрус. Значения фактической кислотности, обменной кислотности, содержание органического углерода и дыхательную активность микроорганизмов определяли по общепринятым методикам [Воробьева, 1998]. Содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Pb, Ni, Cd) определялось атомно-абсорбционным методом согласно РД 52.18.685 (2007).

Результаты анализов (табл. 1) показали, что исследованные образцы преимущественно имели нейтральную и слабокислую реакцию среды, криокониты были преимущественно сходны с исследуемыми почвами. В то же время, в разных образцах и горизонтах почвенного профиля наблюдалась существенная вариабельность между значениями pH H<sub>2</sub>O и pH KCl. Важную роль в этом играет минералогический состав, а также содержание мелкозема и гумуса. Они способны увеличить поглощение ионов водорода в изучаемых почвах, что приводит к подкислению почвенного раствора.

Самые высокие значения базального дыхания среди исследованных образцов были характерны для криоконитов с ледника Гарабаши. В почвах этот показатель уменьшался с глубиной, высокие значения были отмечены в почвах на берегу реки Терскол, что может свидетельствовать о дополнительном поступлении элементов питания с флювиогляциальным переносом с поверхности ледника. Это подтверждается высокими значениями углерода органических соединений в верхнем горизонте пойменной почвы (8.55 %), что способствует развитию микроорганизмов. Криокониты характеризовались низким содержанием углерода (до 0.92%), при этом отмечено его увеличение вблизи туристической инфраструктуры. Другими причинами низких значений могут быть его поглощение микроорганизмами и активный перенос на прилегающие территории.

Криокониты на леднике Гарабаши активнее других накапливали тяжелые металлы (макс., мг/кг: Cu=2.06, Zn=55.4, Ni=21.07, Pb=26.03, Cd=0.571). В приледниковых почвах максимальные значения тяжелых металлов отмечались в верхнем горизонте почв пастбищного луга (мг/кг: Cu =7.74, Zn = 64.4, Ni = 6.35, Pb = 8.22, Cd = 0.42), что указывает на значимую роль переноса тяжелых металлов с поверхности ледников.



№	Тип образца	Место отбора	Горизонт, глубина (см)	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Базальное дыхание, mg CO <sub>2</sub> * 100 грамм в сутки	Углерод органических соединений, %	
1	Криоконит	Ледник Малый Азау	Поверхность ледника	6.00 (± 0.07)	4.67 (± 0.04)	21.47 (± 3.00)	0.09 (± 0.01)	
2				6.46 (± 0.06)	5.24 (± 0.05)	16.17 (± 2.60)	0.05 (± 0.01)	
3				6.03 (± 0.01)	4.45 (± 0.05)	17.41 (± 2.37)	0.13 (± 0.01)	
4				6.00 (± 0.07)	5.00 (± 0.02)	25.55 (± 1.71)	0.37 (± 0.04)	
5	Морена	Ледник Малый Азау	Поверхность ледника	6.81 (± 0.08)	5.26 (± 0.03)	18.79 (± 2.14)	0.07 (± 0.01)	
6	Криоконит			6.41 (± 0.05)	5.88 (± 0.04)	66.89 (± 3.46)	0.92 (± 0.07)	
7	Морена			5.97 (± 0.06)	5.70 (± 0.02)	27.04 (± 3.36)	0.08 (± 0.01)	
8	Почва	Ущелье Терскол	AU, 0–10	5.52 (± 0.06)	4.62 (± 0.10)	23.19 (± 4.57)	0.78 (± 0.28)	
9			AU, 10–20	5.94 (± 0.10)	4.87 (± 0.07)	11.49 (± 3.22)	0.22 (± 0.06)	
10			AC, 20–35	6.13 (± 0.08)	4.92 (± 0.04)	14.40 (± 3.77)	0.14 (± 0.03)	
11			C, 35–40	5.94 (± 0.06)	4.88 (± 0.03)	21.56 (± 5.58)	0.16 (± 0.03)	
12		Левый берег реки Терскол	H, 0–7	5.49 (± 0.05)	4.51 (± 0.02)	41.01 (± 4.35)	8.55 (± 0.42)	
13			AU, 7–13	5.80 (± 0.06)	3.86 (± 0.07)	28.48 (± 4.26)	6.14 (± 0.27)	
14			AC, 13–25	6.45 (± 0.06)	3.80 (± 0.02)	25.83 (± 1.83)	2.01 (± 0.10)	
15		Ущелье Терскол	TE, 0–10	5.31 (± 0.14)	4.77 (± 0.05)	62.29 (± 7.25)	28.69 (± 4.19)	
16			TE, 10–30	4.09 (± 0.17)	3.68 (± 0.14)	36.09 (6.18)	19.21 (± 3.72)	
17		Криоконит	Ледник Гарабаши, верхняя часть	Поверхность ледника	6.86	5.42	15.70	0.11
18					6.38 (± 0.14)	5.51 (± 0.18)	19.96 (± 2.38)	0.15 (± 0.01)
19					6.64 (± 0.16)	5.83 (± 0.18)	43.87 (± 3.21)	0.52 (± 0.06)

**Табл. 1.** Параметры надледниковых отложений и перигляциальных почв по результатам проведенных анализов (в образцах, взятых в трех повторностях, указаны среднее значение и стандартное отклонение).

Таким образом установлено, что криокониты являются накопителем и дополнительным источником углерода и тяжелых металлов для перигляциальных почв в Приэльбрусье, что может как ускорить их развитие в данном регионе, так и влиять на уровень загрязнения, что стоит учитывать при планировании сельского хозяйства.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Работа выполнена при финансовой поддержке НЦМУ «Агротехнологии будущего».

*Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. Москва: Издательство МГУ, 1998. 272 с.

*РД 52.18.685.* Определение массовой доли металлов в пробах почв и донных отложений. Нижний Новгород: Росгидромет, 2007. 33 с.

Классификация и диагностика почв России. Авторы и составители: *Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с.

## Температура криогенных почв и подстилающей мерзлоты на участках распространения надмерзлотных таликов и за их пределами в Центральной Якутии

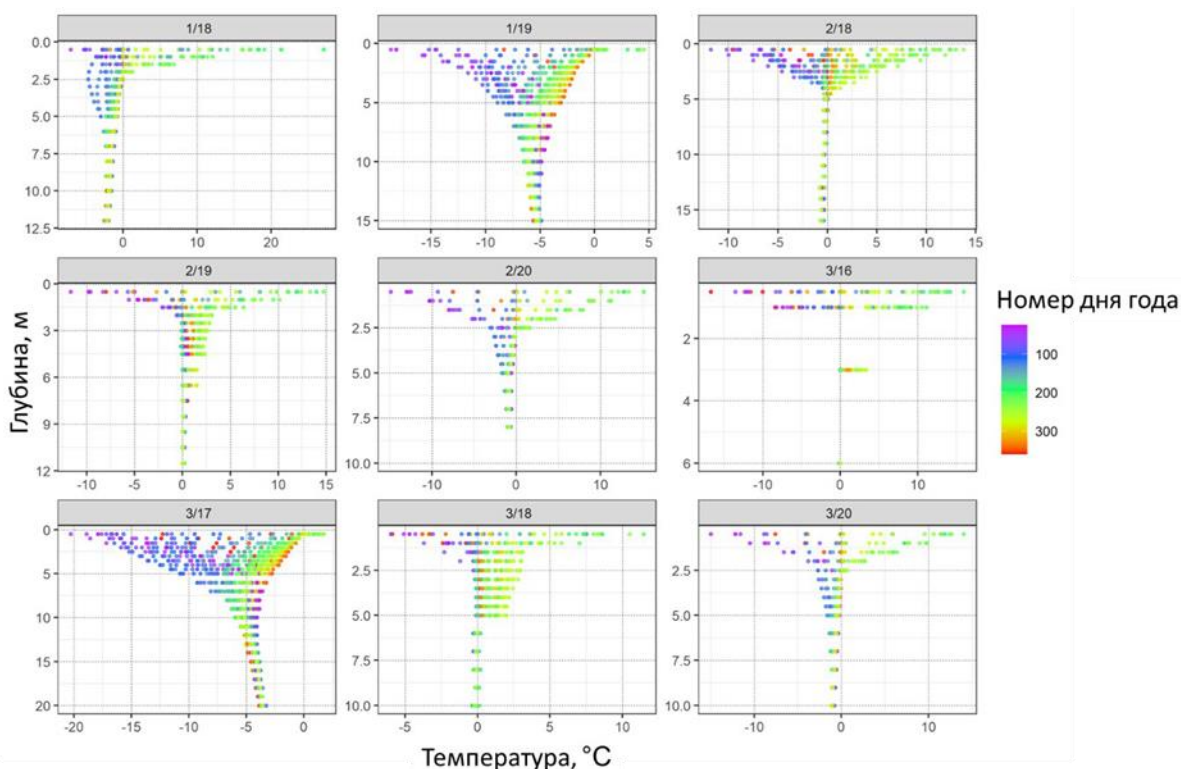
*Лебедева Л.С., Баишев Н.Е., Ефремов В.С., Огонеров В.В.*

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия*

*e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com*

Талики являются единственными путями фильтрации подземных вод в сплошной криолитозоне. Часто при деградации криолитозоны формируются надмерзлотные талики (несмыкающаяся мерзлота). Несмотря на низкую среднегодовую температуру воздуха ( $-9,5^{\circ}\text{C}$ ) и малое количество осадков (268 мм/год), в сплошной криолитозоне Центральной Якутии существуют субаэральные надмерзлотные водоносные талики. Они развиваются на пологих склонах, сложенных песчаными отложениями и покрытых сосновым редколесьем. В работе представлен анализ сезонной и межгодовой динамики температуры грунта в контрастных геокриологических условиях – на участках распространения криолитозоны с поверхности и надмерзлотных субаэриальных таликов.

Ключевой участок Левая Шестаковка расположен в 20 км к юго-западу от Якутска. Кровля многолетнемерзлых пород на ключевом участке залегает на глубине от 0,5 до 20 м. Из десяти скважин, в которых имеются температурные измерения продолжительностью более 2 лет, шесть расположены в сосновом лесу на песчаных отложениях. Три из них вскрыли субаэральные надмерзлотные водоносные талики. На рис. 1 представлены температурные кривые для девяти скважин, в которых проводились замеры на глубинах менее 3 м в последние годы.



**Рис. 1.** Температурные кривые в девяти скважинах на ключевом участке Левая Шестаковка в разные дни года за период 2017-2022 гг.

Температурные кривые в скважинах 2/19, 3/16 и 3/18 подтверждают наличие постоянно талых пород ниже слоя сезонного промерзания. Мощность слоя сезонного промерзания над таликом составляет 2-2,5 м. Подошва талика и соответствующая ему

кровля многолетнемерзлых пород находятся на глубине ориентировочно 6 м в скважинах 3/16 и 3/18. В скв. 2/19 граница талика и многолетней мерзлоты находится ниже 12 м – самого нижнего горизонта, где имеются измерения температуры. По данным бурения подошва талика находится на глубине 20 м. В других скважинах, расположенных в сосновых лесах (2/18, 2/20 и 3/20), кровля многолетнемерзлых пород залегает в основании сезонно-талого слоя на глубинах 2,5-5 м.

Скважины в других ландшафтных условиях (3/17 в долине реки и 1/19 на мари) характеризуются низкими температурами пород и неглубоким сезонным протаиванием. Глубина сезонного протаивания колеблется от 0,5 до 1,0 м. Температуры пород на глубинах от 3 до 12 м подвержены более выраженным сезонным колебаниям, чем в скважинах в таликах. Например, на глубине 3 м амплитуда температуры пород в течение года в речной долине и на мари составляет 12,7°C, 8,8°C и 9,1°C соответственно, а в сосновом лесу она колеблется в пределах 2,5°C и 3,5°C. На глубине 10 м амплитуда температур составляет 1,6-1,9°C на участках холодной мерзлоты и 0,3°C в сосновых лесах. В сосновых лесах сезонная амплитуда температуры пород резко падают на глубине 2-3 м, где располагается кровля водоносного горизонта. Водонасыщенные песчаные отложения промерзают медленно из-за большого количества энергии, необходимой для фазовых переходов. Водонасыщенные породы ниже глубины 4-5 м имеют почти постоянную околонулевую температуру в течение всего года. Глубина нулевых годовых амплитуд составляет 5-12 м в сосновых лесах и 15-20 м на участках холодной мерзлоты.

Наблюдается различная динамика температуры пород за последние 5-6 лет. Она повышается в скважинах, расположенных в долине реки и на мари, где среднегодовая температура пород на глубине годовых нулевых амплитуд -2°C и ниже. В сосновых лесах и на участках распространения таликов температура пород стабильна или колеблется незначительно.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда № 22-17-20040 «Субаэральные и подозёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

## Анализ многолетней динамики температурного режима мерзлотных черноземов юга Витимского плоскогорья

*Мангатаев А.Ц., Бадмаев Н.Б., Гончиков Б.-М.Н.*

*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ, Россия*

*e-mail: aleksandr\_man@mail.ru*

Выявление закономерности формирования температурного и водного режимов позволяют объективно оценить почвы по характеру их мерзлотности, что имеет важное значение для переходной зоны Забайкалья (выделение контуров мерзлотных и сезоннопромерзающих почв, разработка основ природоохранных мероприятий, агротехника полевых культур, водотепловых мелиораций). Целью исследований является анализ полученных экспериментальных данных температурного и водного режимов в почве в связи с глобальными изменениями климата.

Многие исследователи [Ногина, 1964; Макеев и др., 1986] упоминают в общих чертах значение почвенного криогенеза в формировании почв и почвенного климата. По их мнению, многолетняя мерзлота может быть оценена как дополнительный фактор (необязательный, локальный в отличие от пяти докучаевских факторов почвообразования). Однако в более поздних работах [Бронникова и др., 2022] криофакторы рассматриваются не как самостоятельный фактор, а как почвенные процессы и свойства.

Таким образом, проблема причинно-следственной связи многолетней мерзлоты и почвообразования является еще не решенной. Накоплено мало экспериментальных данных о режимах почв, через многолетнее и непрерывное действие которых на фоне криогенеза формируется их генетический облик, свойства и плодородие.

Впервые с помощью новых инструментальных технологий (термохронов) проведен комплектный анализ изменений температурного режима почв и климата переходной зоны Забайкалья в течение пятидесятилетнего цикла.

Глобальное изменение климата северного полушария определяет повышение температуры воздуха на  $0,8^{\circ}\text{C}$ , в среднем по России – от  $0,9$  до  $1,1^{\circ}\text{C}$ , в отдельных пунктах российского Севера – на  $1,0$ - $1,5^{\circ}\text{C}$ . В Забайкалье за столетний период температура воздуха в приповерхностном слое атмосферы повысилась на  $1,7^{\circ}\text{C}$ .

Наши инструментальные данные по атмосферному климату и температурному режиму мерзлотной лугово-черноземной почвы (рис. 1) показывают, что на юге Витимского плоскогорья (в переходной зоне от сплошной многолетней мерзлоты к островной) заметна тенденция к повышению среднегодовой температуры воздуха и снижению количества осадков.

При такой тенденции атмосферного климата в исследуемых почвах отмечается деградация многолетней мерзлоты на  $50$ - $70$  см, скорость процесса которого с  $1965$  по  $1975$  составляла  $1$  см/год. В период, с  $1975$  по  $2022$  годы скорость деградации увеличились почти в  $2$  раза  $1,5$ - $1,8$  см/год.

Т, °С	Конец 60-х		Начало 80-х		Настоящее время	
	дни	см	дни	см	дни	см
15	79	15	60	22	56	40
10	96	45	90	90	88	65
5	126	70	140	130	127	130
0	210	220	185	240	180	280
-2	205	300	205	290	212	300
-5	138	200	158	200	176	180
-10	112	150	108	130	140	99
-15	80	65	69	95	89	71

Анализ данных температурного режима почв за 2022 год свидетельствует о том, что биологически активная температура ( $>10^{\circ}\text{C}$ ) стала проникать до 80-90 см, что ниже по глубине на 20-30 см, чем было в 1965 году. Также происходят изменения в распределении влажности почв. Наблюдается иссушение верхних горизонтов, и некоторое увеличение влажности в нижней части почвенного профиля при деградации многолетней мерзлоты.

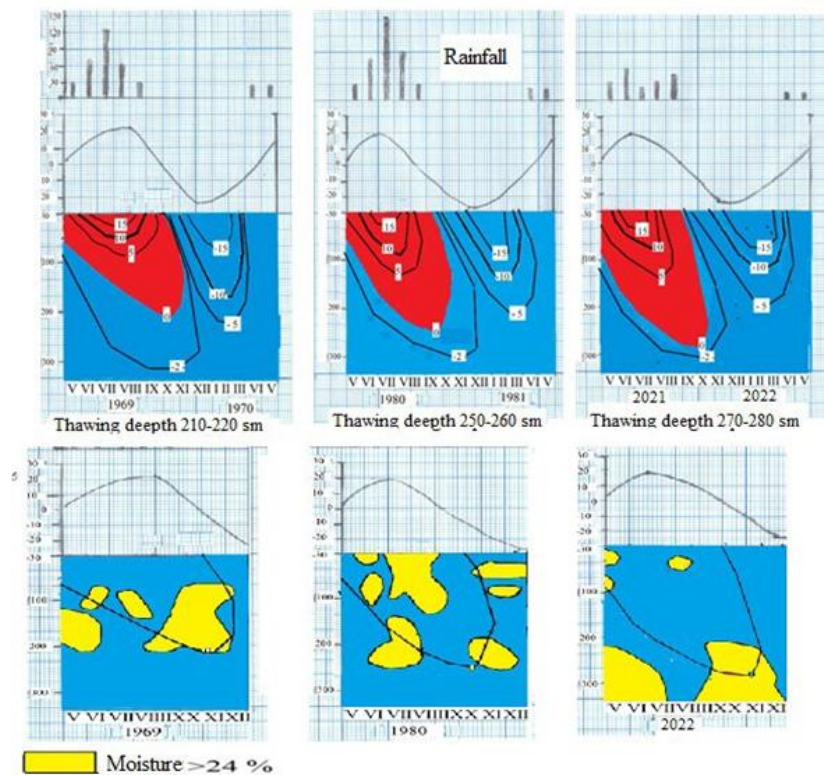


Рис. 1. Тренд температуры воздуха, осадков и глубины промерзания и влажности почвы.

1. За последние 50 лет заметна тенденция повышения температуры воздуха и уменьшения количества осадков. При этом наблюдается потепление зимних температур и похолодание летнего периода.
2. Вследствие этих процессов выделены три разных периода, где наиболее заметны различия в климате почв: увеличивается глубина протаивания с 220 см в 60-ые годы до 250 см в начале 80-х годов и 320 см в настоящее время.
3. Скорость протаивания за последние 30 лет увеличилась в два раза, до 1,8 см в год. При этом уменьшилась продолжительность дней с изотермой 0 градусов с 210 до 185 и 180 дней соответственно трех разных периодов.
4. Анализ режима влажности почв показывает изменение их показателей. В качестве единицы влажности нами выбрана величина выше 24% от объема, равная НВ. Анализ хроноизоплет свидетельствует об уменьшении ее величины в средней части профиля почв в настоящее время и увеличении в нижней части по сравнению с 60-80 –ми годами XX века. Повышение влажности в нижней части связано с увеличением протаивания почв.

Бронникова М.А., Герасимова М.И., Конопляникова Ю.В., Гурков Е.А., Черноусенко Г.И., Голубцов В.А., Ефимов О.Е. Криоаридные почвы как генетический тип в классификации почв России: география, морфология, диагностика // Почвоведение, 2022, №3, С. 263-280.

Макеев О.В. Современная концепция почвенного криогенеза, эволюция криогенных почв в голоцене и проблемы мелиорации почв с мерзлотой в профиле // Эволюция и возраст почв СССР. Пушино, ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1986, с. 37-46.

Ногина Н.А. Почвы Забайкалья (Текст) / Акад. наук СССР. Почв. ин-т им. В. В. Докучаева. Москва: Наука, 1964. 314 с.

## Органоминеральные взаимодействия на ледниках: примеры почвоподобных процессов

*Мергелов Н.С., Зазовская Э.П., Долгих А.В., Горячкин С.В.  
Институт географии РАН, Москва, Россия  
e-mail: mergelov@igras.ru*

В последние десятилетия парадигма гляциологии и смежных наук сменилась с абиотической на био-абиотическую. Ледники стали рассматривать как отдельный биом, ранее «забытый» в составе обитаемой криосферы [Anesio and Laybourn-Parry, 2012].

Важный компонент органоминеральной фации на леднике – это криоконит, который подразделяется на инситный и переотложенный. Инситный криоконит формируется в «стаканах» протаивания, обеспечивающих стабильные условия для образования крупных сложноорганизованных гранул с множественными концентрическими слоями и микропрофилями в направлении центр-периферия, а также стратификацией между зоной первичной продукции органического вещества и зоной его преобразования гетеротрофными микробными сообществами. Основные принципы взаимодействия микроорганизмов и минералов в современных гранулах криоконита могут быть аналогичны тем, что существовали на ледниках ранее в истории Земли особенно во время крупных оледенений, таких как гуронское (2,4–2,2 млрд. л.н.) или в криогении (0,72–0,64 млрд. л. н.).

Мы исследовали взаимодействие минеральных и органических компонентов в гранулах криоконита с ледников Левый Актру (Алтай), Гарабаши (Кавказ) и Бертель (Шпицберген) при помощи рентгеновской микротомографии, световой и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с технологией MAPSMineralogy, а также рамановской спектроскопии. Агрегаты криоконита были разделены на мезогранулы (1-6 мм) и микрогранулы (0,1-1 мм). Мезогранулы часто состояли из более мелких субгранул, микрогранулы являлись первичными образованиями. Гранулы обеих групп имели сходную структуру и общую пористость в пределах 15-16%. Доля связанных пор была высокой и стабильной (88-89%). Размеры пор находились в пределах 10-220 мкм (чаще 30-110 мкм) для мезогранул и 10-60 мкм (чаще 14-38 мкм) для микрогранул, при этом более крупные поры в обоих случаях были приурочены к центру гранул. Гранулы часто имели минеральный «зародыш», представленный зерном первичного минерала или обломком породы, а также уплотненный слой по периферии. Филлосиликаты (сметит, каолинит, хлорит, слюда) являлись важным компонентом, обеспечивающим физическую стабильность гранул наряду с бактериальными внеклеточными полимерами и нитчатými цианобактериями. Наибольшая концентрация пылеватых и глинистых частиц (до 31,6% сметитов) приходилась на периферическую часть гранул. В стенке гранул частицы минералов были наиболее плотно упакованы и ориентированы субпараллельно наружной поверхности. СЭМ выявила тонкую многослойную структуру филлосиликатных кластеров в стенке гранул: до 18 слоев в микрогранулах и >50 слоев в мезогранулах. Кластеры глинистых минералов были всегда скреплены аморфным углеродсодержащим цементом. По данным рамановской спектроскопии метильные функциональные группы ( $-CH_3$ ) в составе органического вещества были также приурочены к стенкам гранул, что свидетельствует о гидрофобных свойствах поверхности, необходимых для устойчивости криоконитовой микрэкосистемы в талой воде. Постоянная внешняя оболочка была важнейшим и самым сложноорганизованным компонентом гранулы, обеспечивающим стабильные условия для микробной трансформации органического вещества внутри гранул.

Таким образом, новые данные о строении и некоторых аспектах химического состава материала криоконита, позволяют заключить, что его основная структурная единица, гранула, является самостоятельной сложноорганизованной многопорядковой микрэкосистемой, одновременно обособленной в водной супрагляциальной обстановке, но также и проницаемой для потоков вещества благодаря развитой системе пор. Физические и

химические механизмы стабилизации органоминеральных агрегатов криоконита сходны с принципами агрегации в сложных коллоидных системах, например, почвах: (1) окклюзия/инкапсуляция, (2) образование гранул/ооидов, (3) адсорбция на активных минеральных поверхностях, например, глинистых минералах, (4) гидрофильно-гидрофобные взаимодействия. Помимо стратифицированных гранул криоконита, сходных с почвенными агрегатами, на поверхности ледников, возможно, образование микропрофилей первичных почв (протопочв, солоидов). Нами изучены профили, образовавшиеся под шаровидными колониями мха, так называемыми «ледниковыми мышками», на леднике Бертель (о. Западный Шпицберген). Профили первичных почв суммарной мощностью до 6 см состояли из 4-х микрогоризонтов, включая аналоги таких классических почвенных горизонтов как подстильно-торфяной (O), грубогумусовый (AO), гумусово-слаборазвитый (W) и минеральный (BC). Выявлено повсеместное участие гранулированного органоминерального материала криоконита, в том числе его инкапсуляция ризоидами мха. По данным рамановской спектроскопии, в горизонте BC, который моховые сообщества используют как основной минеральный субстрат, преобладали кварц, полевые шпаты, кальцит, арагонит и частицы ископаемого угля, что отражает состав окружающих ледник пород и указывает на преобладание локального материала. Морфология, трагиграфия и органо-аккумулятивный тип распределения органического вещества указывают на формирование или сохранение почвоподобных микропрофилей под моховыми сообществами на поверхности ледника. Хотя явление «ледниковых мышек» многократно описано гляциологами [Hotaling et al., 2020], признаки первичного почвообразования и почвенные микропрофили в данных объектах зафиксированы нами впервые. Считается, что это эфемерные образования, а в их перемещении по леднику существенную роль играют ротационные механизмы (перекачивание и перевертывание подушек мха). Однако обнаруженные почвенные микропрофили явно указывают на продолжительные периоды стабильности в существовании данных объектов. Такие профили не могли сформироваться в течение одного сезона, длительность почвенных процессов дифференциации должна была достигать нескольких лет.

Мы рассматриваем две гипотезы образования почвенных микропрофилей: (1) перигляциальное происхождение – подушка мха с прикрепленным дифференцированным на горизонты субстратом была занесена из окружающих ледник ландшафтов; (2) супрагляциальное происхождение – микропрофиль сформировался непосредственно на леднике при закреплении мха на минеральном субстрате, например, на обломочном материале абляционной морены; споры мха были занесены ветром или птицами. Участие гранул криоконита во всех горизонтах профиля «ледниковой мышкы» и тесная интеграция гранул с ризоидами мха и минеральной массой дополнительно указывают на длительное совместное образование именно в супрагляциальной обстановке.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00212.

*Anesio A.M., Laybourn-Parry J.* Glaciers and ice sheets as a biome // Trends in ecology & evolution, 2012, 27(4), pp. 219–225. DOI: 10.1016/j.tree.2011.09.012.

*Hotaling S., Bartholomaeus T.C. & Gilbert S.L.* Rolling stones gather moss: movement and longevity of moss balls on an Alaskan glacier.// Polar Biology, 2020, 43(6), pp. 735–744. DOI: 10.1007/s00300-020-02675-6.

## Процессы деструкции растворенного органического вещества в речных и почвенных водах северной тайги Западной Сибири

*Раудина Т.В.<sup>1</sup>, Смирнов С.В.<sup>1,2</sup>, Истигечев Г.И.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Томский государственный университет, Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
e-mail: tanya\_raud@mail.ru*

Растворенное органическое вещество (РОВ) является одним из крупнейших биологически доступных источников углерода в водных экосистемах, а его динамика имеет решающее значение для локального и глобального циклов углерода. Важность РОВ в значительной степени определяется процессами био- и фотодеструкции, считающиеся важной движущей силой выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу [например, Abbott et al., 2014; Koehler et al., 2014]. Большая часть Западной Сибири характеризуется высокой заболоченностью (до 70-80%). При этом особый интерес вызывают мерзлые болота южной границы криолитозоны, отличающиеся наибольшей динамичностью ландшафтов. Поэтому почвенные и поверхностные воды прерывистой криолитозоны Западной Сибири, обогащенные РОВ, представляют особый интерес с точки зрения количественной оценки потенциала деструкции, что необходимо для прогнозирования поведения углерода и его потенциального вклада в глобальные изменения. В связи с этим основной целью работы явилось экспериментальное изучение процессов био- и фотодеструкции РОВ речных и почвенных вод в условиях юга криолитозоны Западной.

Для изучения деструкции РОВ от торфяных почв плоскобугристого болота через небольшие водотоки к пойме малой реки были отобраны почвенные и речные воды на ключевом участке в северной тайге (63,78° с.ш.; 75,62 в.д., окрестности пос. Ханымей, ЯНАО). Выбранный участок расположен в пределах плоской междуречной заозеренной равнины, сложенной легкими почвообразующими породами. Территория характеризуется существенной пространственной неоднородностью, которая выражена в сложном сочетании болотно-озерных ландшафтов с различным составом и временем пребывания воды. Основными элементами болотного микрорельефа являются бугры, мочажины, топи, которые достаточно контрастны по морфологическим, фитоценотическим параметрам и функциональным характеристикам (рис. 1).



**Рис. 1.** Ландшафты ключевого участка (вид сверху), представленные замкнутыми и транзитными топами и приозерными мочажинами (А), плоскими буграми (В), мерзлотными просадками (С), поймой малой реки (D) с точками пробоотбора (стрелки).

Биодоступность РОВ (% БРОУ) была оценена с помощью инкубационных экспериментов, представляющих собой показатель микробного поглощения и минерализации (Vonk et al., 2015). Для определения содержания фоторазлагаемого углерода (%ФРОУ) образцы воды фильтровались (0,22 µm, Millipore) и размещались в герметично закрытых стерильных кварцевых пробирках под открытым солнцем в натуральных условиях в течение 28 дней. После повторной фильтрации в образцах определялись рН,



содержание растворенного органического углерода (РОУ, Vario TOC Cube) и оптические плотности [Variscen, Cary 50 Scan. UV – Visible] для оценки качественного состава РОВ путем расчета спектрофотометрических характеристик ( $E_{254}:E_{436}$ ,  $E_{250}:E_{365}$ ,  $S_{275-295}$ ,  $S_{350-400}$ ,  $S_R$ ;  $SUVA_{254}$ ). В ходе инкубации образцов воды РОУ показал значимое линейное снижение во всех образцах ( $p < 0,05$ ,  $R_2 = 0,45-0,86$ , а значения %БРОУ увеличение ( $p < 0,05$ ,  $R_2 = 0,65-0,87$ ). Некоторые отрицательные значения РОУ в конце эксперимента связаны с тем, что микроорганизмы также производят РОУ во время его разложения. Наибольший процент БРОУ отмечается для почвенной воды в пойме ручья и самого ручья (20-25%), что в целом соответствовало значениям, полученным для арктических речных систем (обычно от 10 до 40%). При этом к 28 дню наибольшая скорость вывода РОУ ( $RDOC_{28}$ ), наблюдается в почвенных водах бугров, мочажины. Тенденция к снижению значений  $RDOC_{28}$  от бугров к ручью и обратная тенденция для значений БРОУ предполагает, что почвенные воды, расположенные в начале пути, содержат быстро обрабатываемый РОУ, в то время как речные воды содержат медленно обрабатываемый РОУ. Такие различия могут быть в первую очередь обусловлены скоростью перемещения воды, которые являются определяющими факторами биодegradации РОВ.  $SUVA_{254}$  увеличивается во всех образцах во время инкубации с наибольшими значениями для бугров и мочажины ( $p < 0,05$ ,  $R_2 = 0,8$ ), что указывает на удаление в первую очередь алифатических, низкомолекулярных соединений РОВ. Значения  $E_{254}:E_{365}$ ,  $E_{250}:E_{365}$  подтверждают увеличение к концу инкубации высокомолекулярных соединений. Увеличивающееся рН во время инкубации также может быть связано с уменьшением доли, как низкомолекулярных органических кислот, так и фракции фульвокислот. В ходе эксперимента по фотодеструкции к 28 дню в водах наблюдается заметное снижение концентрации РОУ во фракции  $< 0,22$  мкм ( $p < 0,05$ ,  $R_2 = 0,59-0,62$ ) и увеличение ФРОУ до 14%. Соответственно %ФРОУ имеет прямую линейную зависимость от времени инкубации и его наибольший процент отмечается в почвенно-болотной воде бугра и мочажины (7,8 и 13,6% к 28 дню соответственно) по сравнению с ручьем. Снижение  $SUVA_{254}$ ,  $S_{350-400}$  и увеличение  $S_R$ ,  $S_{275-295}$  и их корреляция говорит о потере высокомолекулярных органических соединений или связано с их разрушением до низкомолекулярных, которые удаляются уже при повторной фильтрации. А увеличение доли низкомолекулярных соединений в свою очередь может повысить их биодоступность. Учитывая различия в обработке РОВ в начале и в конце гидрологического, результаты подчеркивают необходимость учета этой неоднородности для количественной оценки циклов С в мерзлых торфяниках.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ (проект № 21-77-00021).

*Abbott B.W., Larouche J.R., Jones J.B., Bowden W.B., Balsler A.W.* Elevated dissolved organic carbon biodegradability from thawing and collapsing permafrost // *J. Geophys. Res.*, 2014, Vol. 119, No. 10, pp. 2049-2063. DOI: 10.1002/2014JG002678.

*Koehler B., Landelius T., Weyhenmeyer G.A., Machida N., Tranvik L.J.* Sunlight-induced carbon dioxide emissions from inland waters // *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2014, Vol. 28, No. 7, pp. 696-711. DOI: 10.1002/2014GB004850

*Vonk J.E., Tank S.E., Mann P.J., Spencer R.G.M., Treat C.C., Striegl R.G., Abbott B.W., Wickland K.P.* Biodegradability of dissolved organic carbon in permafrost soils and aquatic systems: A meta-analysis // *Biogeosciences*, 2015, Vol. 12, No. 23, pp. 6915-6930. DOI: 10.5194/bg-12-6915-2015.

## Динамика тепловых потоков и структура годовых теплооборотов в мерзлотной почве притундрового редколесья Колымской низменности

*Федоров-Давыдов Д.Г.<sup>1</sup>, Остроумов В.Е.<sup>1</sup>, Давыдов С.П.<sup>2</sup>, Давыдова А.И.<sup>2</sup>, Волокитин, М.П.<sup>3</sup>, Еремин И.И.<sup>4</sup>, Кропачев Д.Ю.<sup>4</sup>, Лупачев А.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пуццо, Россия*

<sup>2</sup>*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Северо-восточная научно-экспериментальная станция, Республика Саха (Якутия), пос. Черский, Россия*

<sup>3</sup>*Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пуццо, Россия*

<sup>4</sup>*НПО «Эталон», г. Омск, Россия*

*e-mail: muss-96@yandex.ru*

Пятилетний (2014–2019 гг.) мониторинг тепловых потоков и температур, проводимый в подзоне притундровых редколесий Колымской н-ти (Северо-восточная научно-экспериментальная станция ТИГ ДВО РАН, окрестности пос. Черского, Северная Якутия), позволил составить представление о динамике и структуре годовых теплооборотов в системе «мерзлотная почва – многолетнемерзлая порода». В качестве объекта мониторинга выбрана криометаморфическая палево-метаморфизованная легкосуглинистая почва на пологом склоне (4–5°) южной экспозиции в лишайниково-бруснично-зеленомошном лиственничном редколесье. Датчики теплового потока располагались в почвенном профиле на глубинах: 0 см (под растительным покровом), 40 см и 85 см (подошва деятельного слоя). Температурные датчики помещались в скважину на глубины: 0, 20, 40, 80 и 85 см. Расчет баланса производился по гидрологическим годам (с начала холодного по конец теплого периода). По максимальным среднесуточным температурам летнего сезона рассчитывался показатель теплообеспеченности почвы, равный количеству тепла, расходуемого на ее нагревание от нулевой температуры до максимальных значений.

Годы наблюдений характеризовались повышенной мощностью снежного покрова. Если в большинство предшествующих зим максимальные значения этого показателя по данным метеостанции Черский не выходили за рамки 25–46 см, то в первые четыре зимы мониторинга они изменялись в пределах 61–93 см, и лишь зимой 2018–19 гг. мощность снега снизилась до 48 см.

Сезонное изменение знака теплового потока в изучаемой системе приходилось на вторую половину апреля или первую половину мая и вызывало инверсию температурного градиента. В нижней части почвенного профиля изменение знака теплотока запаздывало на несколько дней, в 2017 г. – почти на месяц. Между периодами охлаждения и нагревания здесь имел место промежуток времени с нулевыми значениями потоков, продолжавшийся от 4 до 22 дней. Со второй половины мая – начала июня верхний датчик фиксировал отток энергии из почвы в атмосферу в ночное время. В средней и нижней частях профиля поток оставался положительным с мая по сентябрь или даже по октябрь (2017 г.).

После схода снежного покрова плотность теплового потока на дневной поверхности резко возрастала на 1–2 порядка. В дальнейшем эта величина постепенно снижалась на протяжении теплого периода. Так, в конце мая ее максимальные значения составляли 106–189, в июне – 81–108, в июле – 62–98, в августе – 45–61, а в сентябре – 35–46 Вт/м<sup>2</sup>. Интенсивность отрицательных ночных потоков обычно увеличивались с июня по сентябрь. На 40 и 85 см максимальные значения плотности потока наблюдались в июле или в августе, когда они были равны 18–23 и 8–11 Вт/м<sup>2</sup> соответственно.

Переход системы к полупериоду сезонного охлаждения происходил в последнюю декаду сентября или в первую декаду октября, также с небольшим запаздыванием у подошвы деятельного слоя. Он выражался в смене направления теплового потока на дневной поверхности и его приостановке в средней и нижней частях почвенного профиля. В 2018 году нулевым потокам у подошвы деятельного слоя предшествовал почти месячный

период (с 16.09 по 13.10) господства отрицательных значений этого показателя. Данные термометрии в том году говорят о частичном промерзании профиля снизу, начавшимся 7 октября.

Плотность зимних потоков тепла в большинстве случаев была значительно меньше таковой как для положительных (дневных), так и для отрицательных (ночных) потоков в летнее время. На всех глубинах проявлялась тенденция к уменьшению абсолютных величин теплоток на протяжении холодного периода, что связано, как с накоплением снежного покрова, так и с ослаблением морозов в начале весны: максимальные значения этого показателя на поверхности снижались с 13-37 до 2-3 Вт/м<sup>2</sup>; на 40 см – с 5-8 до 2-3 Вт/м<sup>2</sup> и на 85 см – с 2-4 до 1-3 Вт/м<sup>2</sup>. Из-за высокой теплопроводности мерзлого грунта плотность зимних потоков уменьшалась по профилю не так интенсивно, как летних. В конце полупериода охлаждения ее значения на разных глубинах были почти одинаковыми.

Годовое поступление тепловой энергии в систему «почва-мерзлота» изменялось от 136,31 до 175,52 МДж/м<sup>2</sup>. Большая часть суммарной величины расходовалась на фазовые переходы «лед-вода». Измерение предзимней влажности в два последних года мониторинга позволило рассчитать эту составляющую теплооборота. Ее значения почти не отличались: 107,5 и 107,6 МДж/м<sup>2</sup>, что составляло 71 и 62% от общего тепла для 2017-18 и 2018-19 гидрологических годов соответственно. На нагревание многолетней мерзлоты в теплое время года расходовалось 29,81-48,21 МДж/м<sup>2</sup> (20- 28%). Теплообеспеченность почвы была равна 11,19-16,02 МДж/м<sup>2</sup> (7-10%) и имела тенденцию к увеличению за годы наблюдений.

Годовые потери тепла в зимнее время составляли 66,50-124,96 МДж/м<sup>2</sup>, при этом минимальными они были в наиболее многоснежную зиму 2017-18 гг., а максимальными – в относительно малоснежную последнюю зиму 2018-19 гг. Положительный баланс тепла для системы «почва-мерзлота» в разные годы составлял 48,56-84,88 МДж/м<sup>2</sup> (28,0-56,1% от общего поступления энергии). Иначе говоря, количество энергии, поступающей с систему «почва-мерзлота» за лето было примерно в 1,4-2,3 раза больше энергии, теряемой в течение зимы. В абсолютном и процентном выражении баланс был минимальным в годовом цикле 2018-19 гг. с относительно малоснежной и максимальным – в 2017-18 гг. с наиболее многоснежной зимой. Необходимо отметить тесную корреляцию баланса тепла в процентах от его приходной статьи с максимальной высотой снежного покрова за зиму ( $r = 0,76$ ) и в особенности за начало холодного периода (по конец ноября) ( $r = 0,97$ ).

Годовой баланс для деятельного слоя был равен 24,83-60,31 МДж/м<sup>2</sup> (22,2-52,7% от поступающей энергии), а для многолетней мерзлоты- 13,89-33,28 МДж/м<sup>2</sup> (37,6- 88,3% от поступающей энергии). Наблюдаемые различия между приходом и расходом тепла, особенно резко выраженные для многолетней мерзлоты, хорошо согласуются с тенденцией к повышению температур в системе «почва-мерзлота» и увеличению мощности деятельного слоя, установленной для изучаемой территории и отражающей глобальное изменение климата в сторону потепления. При этом повышение температуры почвы, в первую очередь, проявлялось в зимнее время. Причиной этого выступало аномально высокое количество твердых осадков в годы мониторинга наряду с повышением температуры воздуха в холодный период.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена в рамках госзаданий ИФХиБПП РАН №122040500038-3, ИФПБ РАН №122041200035-2 и ТИГ ДВО РАН №122020900184-5.

## Минерализационная способность органического вещества тундровых и маршевых почв Северной Якутии

*Ходжаева А.К., Губин С.В.*

*ПНЦБИ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
Пушино, Россия  
e-mail: [khodzhaeva@pbcras.ru](mailto:khodzhaeva@pbcras.ru)*

Цель работы – оценить минерализационную способность органического вещества и определить содержание микробной биомассы и дыхательную активность микроорганизмов в профилях разных типов мерзлотных почв, сформированных в условиях слабой теплообеспеченности, близкого залегания многолетней мерзлоты (<1 м) и различных режимах затопления и засоления. Исследование проводили с образцами из профилей мерзлотных тундровых и маршевых почв, отобранных на севере Якутии, на побережье Восточно-Сибирского моря в районе впадения р. Б. Чукочьа. Изучаемые тундровые почвы, удаленные от моря на 0.5-1 км сформированы на позднеплейстоценовой возвышенности (едоме), представлены криоземом и торфяно- глееземами мерзлотными. Маршевые почвы, затопляемые морскими нагонными и приливными водами, представлены слаборазвитыми маршевыми слоистыми глеевыми засоленными и сильнозасоленными мерзлотными и маршевой торфяно-глеевой засоленной мерзлотной.

Содержание общего органического углерода ( $C_{орг}$ ) в профилях тундровых и маршевых почв варьировало в широких пределах от <1 до 41% с максимумами в верхних органогенных горизонтах и обогащенных детритом слоях. Только в профиле слаборазвитой маршевой слоистой глеевой засоленной мерзлотной почвы содержание  $C_{орг}$  изменялось незначительно (1-3%). Отношение C/N в криоземе и торфяно-глееземах варьировало от 8 до 50, в маршевых почвах от 11 до 21. Таким образом, органическое вещество маршевых почв в большей степени обогащено азотом, чем тундровых. Величины  $pH_{H_2O}$  почвенных суспензий тундровых почв изменялись от кислой до слабокислой, маршевых – от кислой до нейтральной. Величины плотного остатка водных вытяжек маршевых почв варьировали от 0.2 до 4%, степень засоления изменялась от не засоленных до сильно засоленных. Химизм засоления – хлоридно-сульфатный с наиболее высокой концентрацией солей в верхних частях профилей. Гранулометрический состав тундровых почв тяжелосуглинистый с преобладанием фракции крупной пыли. В профилях маршевых почв он изменялся от тяжелосуглинистого с преобладанием фракции крупной пыли до супесчаного с преобладанием фракций мелкого песка и крупной пыли.

В профилях тундровых почв содержание потенциально-минерализуемого органического вещества ( $C_0$ ) варьировало в широких пределах от 35 до 6543 мг/100, составляя 1-18% от  $C_{орг}$ . В маршевых почвах варьирование  $C_0$  по профилям было значительным в слаборазвитой маршевой слоистой глеевой сильнозасоленной мерзлотной и маршевой торфяно-глеевой засоленной мерзлотной почвах (от 61 до 2440 мг/100 г) и менее значительным в слаборазвитой маршевой слоистой глеевой засоленной мерзлотной почве (от 29 до 87 мг/100 г). Процент минерализации органического вещества ( $C_0$ , % от  $C_{орг}$ ) маршевых почв составлял 1-9% от  $C_{орг}$ . Определенные индексы биологической стабильности (ИБС) органического вещества тундровых и маршевых почв показали, что наибольшей стабильностью отличалось органическое вещество слаборазвитой маршевой слоистой глеевой засоленной почвы на часто затапливаемых нагонными морскими водами участках и пятна криотурбированного органического материала в профиле криозема. Содержание углерода микробной биомассы ( $C_{мик}$ ) в образцах из профилей тундровых почв, как и  $C_{орг}$  и  $C_0$ , варьировало в широких пределах от 6 до 1634 мкг/г, уменьшаясь с глубиной и составляя 0.04-0.3% от  $C_{орг}$ . В профилях слаборазвитой маршевой слоистой глеевой сильнозасоленной мерзлотной и маршевой торфяно-глеевой засоленной мерзлотной почвах  $C_{мик}$  варьировало от 8 до 1117 мкг/г, в слаборазвитой маршевой слоистой глеевой засоленной мерзлотной

почве от 24 до 101 мкг/г, составляя от 0.1-0.5% от  $C_{\text{орг}}$ . Вклад  $C_{\text{мик}}$  в  $C_0$  тундровых и маршевых почв составлял от 1 до 21% с максимумами в верхних органогенных и органоминеральных горизонтах и слоях. Определение скорости дыхания микроорганизмов проводили в небогащенных ( $V_{\text{basal}}$ , мкг С-СО<sub>2</sub>/г в час) и обогащенных ( $V_{\text{SIR}}$ , мкг С-СО<sub>2</sub>/г в час) легко доступным субстратом (глюкозой) почвенных образцах.  $V_{\text{basal}}$  тундровых почв так же, как содержание  $C_{\text{орг}}$ ,  $C_0$  и  $C_{\text{мик}}$ , была значительно выше в верхних органогенных и органоминеральных горизонтах (3-41 мкг С-СО<sub>2</sub>/г в час) по сравнению с минеральными (0.04-1.2 мкг С-СО<sub>2</sub>/г в час). В ряду маршевых почв  $V_{\text{basal}}$  также значительно варьировала в маршевой торфяно-глеевой и слабообразитой маршевой сильнозасоленной почвах (2-65 мкг С-СО<sub>2</sub>/г в час), резко уменьшаясь с глубиной. В слабообразитой маршевой слоистой глеевой засоленной мерзлотной почве варьирование  $V_{\text{basal}}$  по профилю, как и содержание  $C_{\text{орг}}$ ,  $C_0$  и  $C_{\text{мик}}$ , было незначительным (от 1 до 6 мкг С-СО<sub>2</sub>/г в час). Внесение легкодоступного органического субстрата увеличило дыхательную активность микроорганизмов тундровых почв в 1.2-46 раз, причем максимальное увеличение наблюдалось в минеральных горизонтах. Скорость дыхания микроорганизмов маршевых почв после внесения органического субстрата возросла в 1.2-5 раза и в отличие от тундровых почв, максимальное увеличение наблюдалось в образцах из верхних частей профилей. Судя по полученным значениям дыхательного коэффициента ( $Q_r$ ), наиболее устойчивое и стабильное состояние микробных сообществ ( $Q_r$  от 0.1 до 0.2) показали верхние органоминеральные горизонты криозема и слои слабообразитой маршевой засоленной почвы. Коэффициенты  $<0.1$ , полученные для минеральных горизонтов торфяно-глеевых почв и криозема, показывают, что микробное сообщество здесь, помимо неблагоприятных гидротермических условий, испытывает недостаток в доступном для питания субстрате. Более высокие величины  $Q_r$  (от 0.3 до  $<1$ ), указывающие, в основном, на наличие неблагоприятных гидротермических условий для микробных сообществ, определены для органогенных и органоминеральных горизонтов торфяно-глееземов, криотурбированного пятна криозема, органогенных и органоминеральных горизонтов и слоев маршевых почв. Значения  $Q_r$ , равные 1 и выше, свидетельствующие о подверженности микробного сообщества стрессовым воздействиям в крайней степени, получены для нижних минеральных горизонтов и слоев маршевых почв.

Таким образом, проведенная оценка минерализационной способности органического вещества, содержания микробной биомассы и дыхательной активности в образцах из почвенных профилей тундровых и маршевых почв, показала что их можно разделить на две группы: I. с максимальными величинами, оцениваемыми показателей в верхней части профиля и резким уменьшением в нижней (криозем, торфяно-глееземы, маршевая торфяно-глеевая засоленная и слабообразитая маршевая слоистая глеевая сильнозасоленная); II. с относительно одинаковыми величинами оцениваемых показателей по всей глубине почвенной толщи (слабообразитая маршевая слоистая глеевая засоленная почва). Минерализационная способность органического вещества почв I-ой группы из верхних частей профилей была очень высокой или высокой (в криоземе), уменьшаясь с глубиной до низкой. Минерализационная способность органического вещества II-ой группы определялась как средняя в верхнем органоминеральном слое и уменьшалась с глубиной до очень низкой. Вклад  $C_{\text{мик}}$  в  $C_{\text{орг}}$  по всем профилям исследуемых почв не превышал 1%. Величина дыхательного коэффициента ( $Q_r$ ) в профилях тундровых и маршевых почв варьировала от  $<0.1$  до 1.5.

## Влияние стебелькового льда на свойства торфяных почв севера Западной Сибири: маленький, но сильный!

*Чепурнова М.А.<sup>1</sup>, Матышак Г.В.<sup>1</sup>, Исаева А.В.<sup>2</sup>, Сефилян А.Р.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля, Москва, Россия  
e-mail: chemaryia@gmail.com

Криогенные процессы многогранны и чрезвычайно разнообразны. Среди широко известных процессов пучения, протаивания, растрескивания, встречаются менее распространенные, такие, например, как стебельковый лёд (СЛ).

Стебельковый лёд (needle ice, pipecrake, СЛ) – широко распространенные криогенные образования, представляющие собой столбики льда высотой до 10-15 см, располагающиеся на поверхности почв, с прослоями почвенного материала внутри. Обычно СЛ формируется на оголенной поверхности почв, не покрытой растительностью. В весенне-осенний период во время ночных заморозков из-за градиента температур между почвенной толщей и приземным слоем атмосферы происходит формирование и рост льда вверх за счет миграции влаги из нижележащих почвенных горизонтов к фронту промерзания. При этом происходит активная криотурбация и разрушение поверхности почв (верхних 5 см). В настоящее время СЛ рассматривается как один из факторов эрозии почвенной поверхности, разрушения растительных остатков, сортировки почвенного материала.

Целью исследования было охарактеризовать влияние стебелькового льда на свойства органогенных почв севера Западной Сибири. В задачи входило изучение динамики общих свойств, а также биологической активности почвенных горизонтов, подвергнувшихся воздействию СЛ. Поставленные задачи решались в полевых и лабораторных условиях. В полевых условиях изучены поверхностные горизонты почв торфяных пятен-медальонов (торфяная олиготрофная деструктивная почва), в лабораторных – на основе манипуляционного эксперимента по искусственному выращиванию СЛ на образцах торфяных почв.

Район исследования расположен на севере Западной Сибири (Надымский район, Тюменская область, ЯНАО; 65°20' N, 72°55' E) на северном пределе распространения тайги. Территория относится к зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород, которые отсутствуют под лесными экосистемами и приурочены к массивам бугристых (мерзлых) торфяников. Оголенные торфяные пятна являются характерным элементом на поверхности бугристых торфяников, располагаются на вершинах и в верхних частях склонов, имеют овальную или округлую форму, площадь до 25 м<sup>2</sup>, и легко диагностируются по отсутствию растительного покрова [Огнева и др., 2016]. В осенний или весенний период, при резких заморозках, на влажной поверхности торфяных пятен происходит активизация образования стебелькового льда, приводящая к формированию хорошо заметной своеобразной мелкобугорковатой поверхности торфяных почв. Верхний маломощный слой, преобразованный СЛ, представляет собой подсушенный торфяный материал, значительно отличающийся от нижележащих слоистых, плотных торфяных горизонтов (менее плотный, более разложен, лучше оструктурен, сильнее оземлён).

Для решения поставленных задач из 5 торфяных пятен медальонов отобраны поверхностные горизонты, на которые влияет СЛ (0-2 см) и нижележащие (2-10 см). Также отобран образец торфа (5-10см) для проведения эксперимента в лабораторных условиях. Для выращивания СЛ использована оригинальная установка, с помощью которой создавался градиент температур (положительной в почве, отрицательной в воздухе) и формировались условия для роста СЛ. Установка вместе с образцом торфяной почвы (с влажностью 80-90% от НВ) была помещена в криостат с температурой -6°С, при этом температура нижней части почвы поддерживалась положительной (5-10 гр) с помощью нагревательного элемента. В ходе месячного эксперимента было проведено 10 циклов промерзания-оттаивания, при

каждом из которых наблюдался рост стебелькового льда высотой 3-4 см. Параллельно проводился вариант эксперимента только с промерзанием-оттаиванием образца торфа без роста СЛ. В работе исследовалось влияние стебелькового льда на общие свойства и на динамику лабильных параметров почв (содержание водоекстрагируемого углерода и азота, базальное (БД) и субстрат-индуцированное дыхание (СИД)).

Результаты полевых исследований показали, что поверхностный горизонт торфяных почв по свойствам существенно отличается от нижележащего. В горизонтах, подверженных воздействию СЛ, зольность увеличивается (на 70%), кислотность значительно не меняется. Наибольшие изменения проявляются в параметрах биологической активности: интенсивность БД увеличивается на 40%, а СИД – в 2 раза. Полевые данные свидетельствуют о повышенной микробиологической активности и увеличении микробной биомассы в горизонтах почв, образовавшихся под влиянием СЛ. Это происходит, по-видимому, в результате поглощения микробиотой высвободившихся легкодоступных соединений, образовавшихся в этих же горизонтах за счёт активного влияния СЛ на деструкцию растительных остатков.

Лабораторный эксперимент показал, что, спустя 10 циклов формирования, СЛ оказал существенное влияние на биологическую активность торфяных почв. Как и в полевых условиях, БД и СИД значительно возросли в сравнении с замораживаемым контролем (на 22 и 30% соответственно). Содержание лабильного углерода изменилось незначительно, а азота – снизилось на 40%.

Таким образом, формирование СЛ приводит к усилению микробиологической активности, увеличению микробной биомассы и интенсивности потребления доступного органического вещества, что свидетельствует о возможной ускоренной минерализации органического вещества почв торфяных пятен, способствующей их оземлению.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-24-00020 «Влияние влажности на биологическую активность торфяных почв криолитозоны».

*Огнева О.А., Матышак Г.В., Гончарова О. Ю. и др.* Почвы торфяных пятен бугристых торфяников севера Западной Сибири // *Криосфера Земли*. – 2016. – Т. 20, № 2. – С. 61–68.

## Факторы и механизмы стабилизации органического вещества в мерзлотных почвах

*Шамрикова Е.В.<sup>1</sup>, Жангуров Е.В.<sup>1</sup>, Денева С.В.<sup>1</sup>, Панюков А.Н.<sup>1</sup>, Яковлева Е.В.<sup>1</sup>, Габов Д.Н.<sup>1</sup>,  
Василевич Р.С.<sup>1</sup>, Шевченко О.Г.<sup>1</sup>, Королев М.А.<sup>1</sup>, Лю-Лян-Мин Е.И.<sup>1</sup>, Патова Е.Н.<sup>1</sup>, Кубик О.С.<sup>1</sup>  
Верба М.П.<sup>3</sup>, Зазовская Э.П.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия

e-mail: shamrikovaelena@yandex.ru

Дивергенция почв и почвенного покрова Севера [Горячкин, 2010] определяет широкую вариативность механизмов стабилизации органического вещества (ОВ). Представлены гумификационные и негумификационные пути [Семёнов и др., 2013] повышения устойчивости ОВ почв. Дискуссия о природе гумусовых соединений (гетерополимеры / супрамолекулярные ансамбли) остается за пределами исследования.

1. Ведущая роль в стабилизации ОВ почв оголенных пятен, широко распространенных в почвенном покрове Высокой Арктики, принадлежит биологическим почвенным корочкам (БПК). Сообщества БПК Полярного Урала характеризуются высоким видовым разнообразием водорослей и цианобактерий (70 видов из 6 отделов). Содержание органических форм  $C_{орг}$  и  $N_{орг}$  на пятнах с развитой БПК достигает 40 и 1% соответственно, что в 70 и 20 раз выше по сравнению с почвами пятен без видимых разрастаний водорослей. Общей чертой состава ОВ почв, формирующихся на кислых породах, является преобладание фульвокислот.
2. Поиск молекулярных механизмов ингибирования процессов разложения органических остатков показал, что ОВ почв в местообитаниях с хорошо развитым растительным покровом наименее подвержено окислительной деградации за счет накопления  $C_{орг}$  и  $N_{орг}$  (включая водорастворимую фракцию), низкого значения C/N, а также существенного содержания аминокислот (АМК). В местообитаниях с разреженной растительностью (*Dryas octopetala*) низкий антиоксидантный статус почв указывает на чувствительность ОВ почв к повышению температуры и улучшению аэрации. Этот фактор в совокупности с низкой продуктивностью тундр и наличием голых пятен, занимающих до 70% площади участка, позволяют отнести подобные экосистемы к наиболее восприимчивым к повышению температур.
3. Селективный анализ компонентного состава ОВ почв выявил, что его сохранность обеспечивается накоплением труднорастворимых органических соединений разных классов. Содержание липидов достигает 15-20%. На тетракозановую, гексакозановую и октакозановую кислоты приходится до 65% от суммы жирных кислот. Накопление ПАУ (до 190 мкг/кг) в основном обеспечивается легкими полиаренами – нафталином (Nath) и фенантrenom (Phen) (80-100%). В АМК-составе гидролизатов почв преобладают (60-75%) нейтральные, наиболее устойчивые Ala, Gly и Thr. Закономерности распределения соединений зависят от продуктивности растительных сообществ, состава биомассы, позиции участка в рельефе, гранулометрического состава почв, процессов криогенеза и пирогенеза.
4. Установлена абиотическая стабилизация ОВ за счет неполного сгорания органического материала. Содержание ПАУ в углистых остатках достигает 800 мкг/кг. Частицы древесных углей диагностированы в микробиоморфных и спорово-пыльцевых спектрах. Возраст углистых частиц составляет  $6340 \pm 30$  л.н. В составе ПАУ преобладают аценофтен, Nath и Phen. Микроморфологически подтверждено наличие углистых остатков в уплотненном глинисто-карбонатно-пылеватом материале, а также их «миграция» внутри трещиноватых карбонатных крупных обломков.
5. Стабилизацию ОВ определяют явления, обеспечивающие его перемещение вглубь



профиля: погребение, карстообразование, криотурбации, нисходящая миграция органоминеральных соединений. Содержание  $C_{орг}$  и  $N_{орг}$  в гумусово-аккумулятивных горизонтах, погребенных современными морскими отложениями, в 3 и более раз превышает их количество в выше- и нижележащей толще. Нисходящее движение веществ обеспечивает надмерзлотную аккумуляцию (до 1.6 раз)  $C_{орг}$  и  $N_{орг}$ . Перемещение органического материала вглубь профилей способствует его сохранности за счет замедления процессов разложения и органоминерального взаимодействия.

6. Стабилизирующее действие на компоненты ОВ оказывают ионы  $Ca^{2+}$  карбонатов за счет образования устойчивых к биодеструкции темноокрашенных гумусовых веществ, условную характеристику которых проводили по составу щелочных экстрактов [Заварзина и др., 2021]. Выделены объекты, формирующиеся на элювии-делювии карбонатных пород (рН до 8.5) и характеризующиеся фульватно-гуматным типом гумуса ( $C_{ГК}/C_{ФК}=1.1-1.9$ ). Среди причин темного окрашивания почв, как карбонатных почв бореального и тропического поясов, почв северо-западного Кавказа с аналогичным типом гумуса, являются гуминовые кислоты (ГК). Содержание ГК достигает 6% (0.1-9.4 и 0.1-11.9% от  $C_{орг}$  и  $N_{орг}$  почв). C/N ГК варьирует 10.0-19.2, что в 1.3-2.1 раза выше C/N почв. Анализ  $^{13}C$  ЯМР спектров препаратов показывает однотипность молекулярного состава. Расчетные среднечисловые молекулярные массы ГК варьируют 17-40 kDa. Доля углерода каждой группы фрагментов (неокисленные алифатические, ароматические структуры, фрагменты карбогидратов) составляет 20-30%. В процессе эволюции размеры молекул ГК уменьшаются за счет деградации парафиновых и карбогидратных структур в пользу конденсированных фрагментов.
7. Распределение  $C_{орг}$  и  $N_{орг}$ , АМК-состава почв и их коллоидных фракций подтвердило закрепление N-органических соединений минеральными поверхностями почв. До трети  $C_{орг}$  и  $N_{орг}$  удерживается почвенной нанофракцией. В почвах континентальных окраин коагуляция растворимых (коллоидных) и взвешенных органоминеральных соединений выражена вблизи устьев крупных рек – зоне смешения речных и морских вод (маргинальные фильтры).
8. Основные механизмы дестабилизации ОВ – образование его мобильных форм, способных к выносу за пределы водосборной территории, а также процессы криогенного измельчения/дезинтеграции органического материала (растительных и углистый остатков), что зафиксировано микроморфологическими исследованиями. Доля  $C_{орг}$  водорастворимых форм от общего  $C_{орг}$  составляет 1-15%. Влияние морской воды вызывает снижение миграционной способности водорастворимого ОВ почв, включая низкомолекулярную фракцию (кислоты, спирты, углеводы).

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена в рамках бюджетной темы НИР № 122040600023-8.

*Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.

*Заварзина А.Г., Данченко Н.Н., Демин В.В., Артемьева З.С., Козут Б.М.* Гуминовые вещества – гипотезы и реальность // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1449-1480.

*Семёнов В.М., Тулина А.С., Семенова Н.А., Иванникова Л.А.* Гумификационные и негумификационные пути стабилизации органического вещества в почве (обзор) // Почвоведение. 2013. № 4. С. 393-407. DOI: 10.7868/S0032180X13040114.

## СЕКЦИЯ 4. КЛАССИЧЕСКИЕ И НОВЕЙШИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ

---

### Вода и лёд в томографических исследованиях структуры почв: различные формы, проблемы детектирования

*Абросимов К.Н.<sup>1</sup>, Романенко К.А.<sup>1</sup>, Рогов В.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень, Россия*  
*e-mail: abrosimov\_kn@esoil.ru*

Рентгеновская компьютерная томография (КТ) стала одним из первых методов, позволяющих изучать мерзлые грунты и почвы без разрушения образца, причем как в мерзлом, так и в талом состоянии. Более того, с разработкой и развитием лабораторных микротомографов процесс заморозки-оттаивания можно воспроизвести в небольших образцах объемом 1-5 см<sup>3</sup>, при этом поэтапно производя томографическую съемку с возможностью последующего сравнения результатов с помощью всех ныне доступных технологий анализа изображения (габариты объекта, объем структурных элементов, их количество, распределение по размерам, ориентации и форме в объеме, связность структурных отдельностей на уровне разрешения съемки).

На томографических данных можно выделить три рентген-контрастных фазы – воздух (поровое пространство), воду или лед, в порах крупнее разрешения съемки и собственно почву (часто в томографических исследованиях употребляется термин «твердая фаза»). Это позволяет оценить изменения структуры и порового пространства, произошедшие результате воздействия заморозки или оттаивания. Как в объектах природного происхождения (почве) так и в искусственных моделях. Например, формирование и ориентацию в пространстве шлировой структуры или пузырьковых пор. [Романенко К.А. и др. 2017]

Однако, методы томографии несовершенны. Рентген-контрастные фазы иногда пересекаются между собой (органоминеральная структура с преобладанием структурных компонентов меньшего размера чем разрешение съемки) или вообще накладываются друг на друга. Например, корневую систему или семена растений фактически невозможно выделить в почве по данным КТ если почва залита водой. По этим же фактически невозможно отличить жидкую (талую) воду от льда на фоне почвы и пор.

По причине особенностей почвы, как объекта, плохо пропускающего рентгеновское излучение, наиболее детальные и качественные изображения будут получаться для объектов малого размера, например, почвенных агрегатов фракций от 1 до 10 мм [Скворцова и др. 2018]. Для более крупных образцов потребуется более мощное и специфичное оборудование типа томографов серии SkyScan 1273. Макромасштаб исследования так же до сих пор вызывает затруднения в плане организации эксперимента. Монолиты диаметром 5-10 см. пока что негде томографировать в мерзлом состоянии. Доступно только изучение последствий цикла заморозки-оттаивания на медицинских томографах или анализаторах кернов, что периодически встречается в современных исследованиях [Leuther, F., Schlüter, S. 2021; Vélez M. и др. 2023].

**БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием «Функции и свойства почв и почвенного покрова» Почвенного института им. В.В. Докучаева.

*Leuther, F., Schlüter, S.* Impact of freeze-thaw cycles on soil structure and soil hydraulic properties. 2021. DOI: 10.5194/soil-2021-13.

*Vélez M., Leuther J. F., Köhne., J. Munkholm, L. Vogeler, Iris.* Effects of freeze-thaw cycles on soil structure under different tillage and plant cover management practices. *Soil and Tillage Research*. 225. 105540. 2023. DOI: 10.1016/j.still.2022.105540.

*Романенко К.А., Абросимов К.Н., Курчатова А.Н., Рогов В.В.* Опыт применения рентгеновской компьютерной томографии в исследовании микростроения мерзлых пород и почв. *Криосфера Земли*, 21(4): 75–81, 2017. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(75-81)

*Скворцова Е.Б., Шейн Е.В., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Юдина А.В., Ключева В.В., Хайдапова Д.Д., Рогов В.В.* Влияние многократного замораживания–оттаивания на микроструктуру агрегатов дерново-подзолистой почвы (микротомографический анализ). *Почвоведение*, (2):187–196, 2018.

## Методы оценки содержания углерода в составе органических и неорганических соединений почв (на примере почв Полярного Урала)

*Ершова М.И.<sup>1</sup>, Шамрикова Е.В.<sup>2</sup>, Ванчикова Е.В.<sup>2</sup>, Лю-Лян-Мин Е.И.<sup>2</sup>,  
Кубик О.С.<sup>2</sup>, Жангуров Е.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,  
г. Сыктывкар, Россия*

<sup>2</sup>*Институт биологии Коми научного центра УО РАН, Сыктывкар, Россия  
e-mail: marina\_ershova\_01@mail.ru*

Педосфера – важный резервуар углерода, представленного органическими ( $C_{\text{орг}}$ ) и неорганическими ( $C_{\text{неорг}}$ ) формами. В мировой практике измерение содержания углерода органических и неорганических соединений почв выполняют различными методами. Возникающая тенденция к цифровизации научных данных о почвах требует гармонизации накопленных сведений для инвентаризации и картирования, моделирования и прогнозирования, мониторинга и рационального использования почвенных ресурсов. Выполнен анализ почв на карбонатных породах (174 образца) с  $C_{\text{орг}}$  (0-40%) и  $C_{\text{неорг}}$  (0-12 %, соответственно карбонатностью 0-100%) разными методами. Надежность последних определялась как конкретным составом почвенного материала, так и точностью метода. Метод потерь массы почвы при прокаливании (ППП) завышает содержание  $C_{\text{орг}}$ . Это объясняется: а) неадекватностью пересчета коэффициент 1.724 (2.326 в нашем исследовании); наличием б) минеральных компонентов, разлагающихся при  $T = 105-550^{\circ}\text{C}$ , в) адсорбированной и химически связанной воды, г) органических соединений, разлагающихся при  $T > 550^{\circ}\text{C}$ . Для почв с содержанием карбонатов 0-100% и  $C_{\text{орг}} < 8.7\%$  согласованные результаты измерений  $C_{\text{орг}}$  на анализаторе и дихроматометрическим методом (Уокли-Блэка) были получены с применением коэффициента пересчета (1.3), учитывающего неполное окисления  $C_{\text{орг}}$ . При более высоком содержании  $C_{\text{орг}}$  (8.7-40%) для почв изучаемой территории коэффициент в методе Уолкли-Блэка снижался до 1.18. Наличие любого количества  $\text{CaCO}_3$  не препятствовало использованию дихроматометрического метода (Уолкли-Блэк, Тюрин) для измерения  $C_{\text{орг}}$ .

Метод ППП и кальциметр (КМ) могут быть рекомендованы для измерения содержания карбонатов. Использование КМ рекомендуется для почв с преобладанием  $\text{CaCO}_3$  в карбонатном составе. Стабильные результаты оценки  $C_{\text{неорг}}$  обоими методами получены для почв с  $C_{\text{неорг}} \geq 2.3\%$  и  $C_{\text{орг}} < 16\%$ . При незначительной разнице в стоимости КМ и муфельной печи на результаты, полученные с помощью кальциметра, влияет меньшее количество факторов (кроме случайных), снижающих точность измерения  $C_{\text{неорг}}$ .

Наиболее актуальным решением для анализа обеих форм углерода в почвах представляется использование анализатора и КМ (табл. 1). Актуально внедрение в практику новых подходов. Перспективно сочетание различных методов термического анализа (термогравиметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия, газоэмиссионный анализ). Альтернативой методам «мокрой» химии может также стать спектроскопия отражения в видимом и ближнем инфракрасном (vis-NIR) и среднем инфракрасном (MIR) диапазонах [Gomez et al., 2020].

Методология	Аналитический сигнал	Преимущества	Ограничения
<b>1. УГЛЕРОД ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЧВ</b>			
Сухое сжигание (анализатор) – окисление Сор <sub>г</sub> , T > 1000°C	Пропорционален количеству CO <sub>2</sub> , выделившегося после окисления C <sub>орг</sub>	Возможность анализа более 100 образцов, широкий диапазон C <sub>орг</sub> , быстрота, экологичность, точность	Влияние карбонатов (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> разложение с выделением CO <sub>2</sub> ), покупка дорогостоящего прибора, газов (кислород, гелий) и расходных материалов, приобретение высокоточных весов
Метод ППП – окисление органического вещества почвы (ПОВ) кислородом, T = 105-550°C в нагревателе	Потеря почвенной массы за счет превращения ПОВ в газообразные продукты (CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O и др.)	Доступное оборудование (печь, весы), широкий диапазон C <sub>орг</sub> , одновременный анализ партии почв (ограничен площадью нагревательной камеры в печи)	Условность коэффициента перевода ПОВ в Сор <sub>г</sub> (Сор <sub>г</sub> = ПОВ/1.724), наличие минеральных соединений, разлагающихся при T = 105-550°C с выделением газообразных продуктов
Дихроматометрия (методы Уолкли-Блэка и Тюрина) с фотометрическим окончанием	Оптическая плотность раствора, связанная с окраской комплексных соединений Cr <sup>3+</sup> , число эквивалентов которых равно числу эквивалентов C <sub>орг</sub>	Не требует дорогостоящего оборудования	Использование постоянного значения эквивалентной массы Сор <sub>г</sub> (M (1/4 C), г/моль) для всех соединений, что условно, неполное окисление Сор <sub>г</sub> , узкий диапазон измерений Сор <sub>г</sub> по методу Тюрина (0.17-8.7%), работа с опасными реагентами (дихромат калия, горячий концентрированный раствор H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), ограниченная рабочая зона (обязательна вытяжка)
<b>2. УГЛЕРОД НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЧВ</b>			
Кальциметр – разложение карбонатов в кислой среде (в колбе КМ)	Объем CO <sub>2</sub> , выделяющийся при разложении карбоната	Быстрота, использование единого реагента (раствор HCl)	Герметизирующая способность КМ, мешающее действие соединений, взаимодействующих с HCl, приводящее к выделению газообразных продуктов (SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S и др.), высокий нижний предел измерения содержания C <sub>орг</sub> , условный перевод CO <sub>2</sub> в CaCO <sub>3</sub> для почв, содержащих MgCO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , низкая точность результатов измерений
Метод ППП – разложение карбонатов, T = 550-800°C в нагревателе	Потеря массы почвы за счет выделения CO <sub>2</sub>	Доступное оборудование (печь, весы), широкий диапазон C <sub>неорг</sub> , анализ партии почв (ограничен площадью нагревательной камеры в печи)	Наличие других соединений, разлагающихся при T = 550-800°C с выделением газообразных продуктов, многократное последовательное взвешивание почвы, приводящее к систематической ошибке
Косвенный метод, расчет	C <sub>неорг</sub> = C <sub>обш</sub> – C <sub>орг</sub>		Ограничения обоих методов, ошибки обоих методов

**Табл. 1.** Характеристика методов измерения углерода органических и неорганических соединений почв.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы НИР № 122040600023-8.

Gomez, C., Chevallier, T., Moulin, P., Bouferra, I., Hmaid, K., Arrouays, D., ... Barthès, B.G., Prediction of soil organic and inorganic carbon concentrations in Tunisian samples by mid-infrared reflectance spectroscopy using a French national library. *Geoderma*. 2020. 375, 114469. DOI:10.1016/j.geoderma.2020.114469 GOST 33850-2016, 2016.

## Моделирование круговорота углерода и эмиссии CO<sub>2</sub> в экосистемах криолитозоны Северной Евразии

Завалишин Н.Н.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

e-mail: nickolos@ifaran.ru

Оценки влияния изменений климата на экосистемы северных регионов с многолетней мерзлотой характеризуются значительной неопределённостью как в силу недостаточных знаний об особенностях биотического круговорота при экстремально низких средних температурах, так и по причине многообразия новых факторов, способных повлиять на него при сдвиге климатических параметров. В связи с этим представляет интерес моделирование биотического круговорота в экосистемах тундры, лесотундры и тайги в арктической зоне при вероятных изменениях климата в XXI веке. Характеристики биотического круговорота – запасы и потоки углерода – измеряются на среднегодовом масштабе времени и в совокупности образуют статические схемы, по которым строятся динамические модели. В этой работе на основе данных о функционировании мохово-кустарничковой тундры (стационар Тарей, п-ов Таймыр) [Базилевич и др., 1986] и среднетаежных лиственных лесах Восточной Сибири [Ведрова и др., 2002; Permafrost ecosystems, 2010] построены агрегированные двухкомпарментальные динамические модели круговорота углерода. Каждая схема включает углерод живого органического вещества (ЖОВ) и мертвое органическое вещество (МОВ) подстилки, напочвенного покрова и корнеобитаемого слоя почвы (Рис. 1). В случае тундры (рис.1а) в состав ЖОВ входит биомасса консументов и деструкторов, разлагающих МОВ (поток  $f_{21}^C$ ) и добавляющих к выходным потокам гетеротрофное дыхание  $y_{12}^C$ , что обусловлено их значительной ролью в динамике тундровой растительности. Для леса (рис. 1б) данных об этом компоненте экосистем недостаточно, а его роль менее значительна, поэтому изъятие фитомассы фитофагами и потребление МОВ деструкторами представлено выходными потоками.

Пул фитомассы экосистемы лиственного леса ( $C_1$ ) поглощает углекислый газ атмосферы в ходе фотосинтеза, выделяет его в ходе автотрофного дыхания, и их разность составляет чистая первичная продукция (NPP). Она распределяется между приростом фитомассы, поглощением и отчуждением её растительными животными (выходной поток  $y_1$ ), опадом и отпадом (поток  $f_{12}$ ). Выходные потоки пула МОВ состоят из гетеротрофного дыхания ( $y_{21}$ ) и экспорта в соседние экосистемы ( $y_{22}$ ), а поток  $q_2$  обозначает пополнение резервуара мертвой органики за счет выпадения из атмосферы и переноса из соседних экосистем. В схеме круговорота углерода в тундре МОВ поглощается деструкторами (поток  $f_{21}$ ), а его разложение происходит через поток гетеротрофного дыхания  $y_{12}$ . Разность поглощения атмосферного углерода и автотрофного дыхания образует чистую первичную продукцию (NPP). Аппроксимация её зависимости от фитомассы осуществляется по статистическим данным о фитомассе и продукции растительного покрова наземных экосистем криолитозоны Северной Евразии, собранным в работе [Базилевич и Титлянова, 2008]. Часть потоковых функций зависит от содержания углерода в посылающем пуле линейно (донорный тип потока), что отвечает биологическим представлениям об их функционировании. Донорными потоками являются опад и отпад, гетеротрофное дыхание, потребление и отчуждение фитомассы животными, экспорт в соседние экосистемы со стоком. Это значит, что можно принять некоторые из них в следующей форме:  $f_{12} = a_{12}C_1$ ,  $y_1 = m_1C_1$ ,  $y_{22} = m_2C_2$ , где коэффициенты могут зависеть от факторов окружающей среды или хозяйственного воздействия.

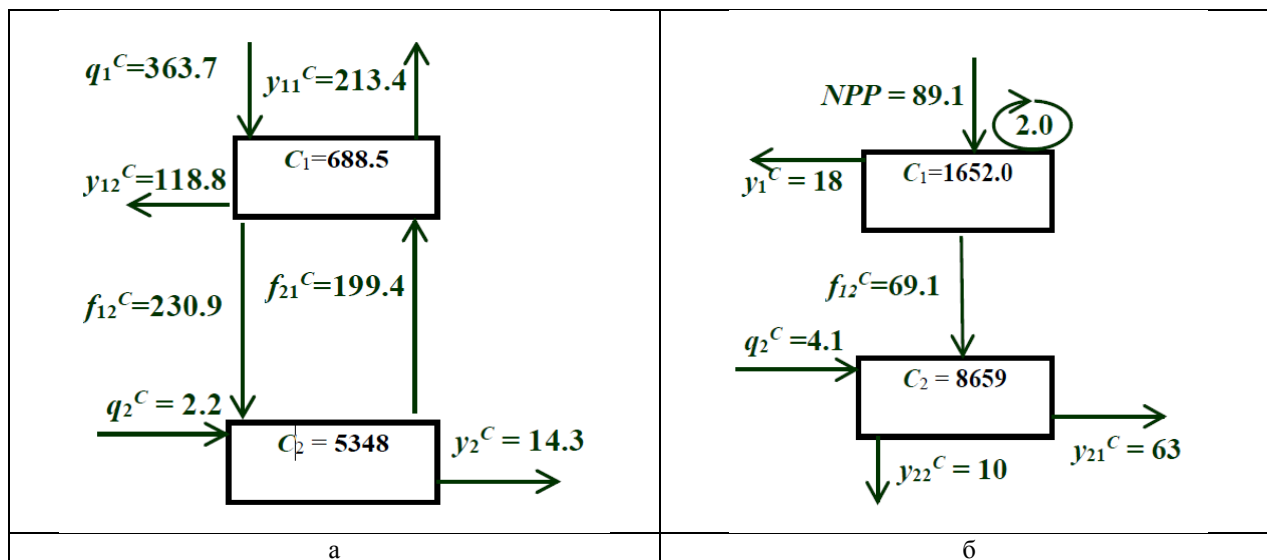


Рис. 1. Агрегированные двухкомпонентные статические схемы круговорота углерода:

- а) мохово-кустарничковая тундра п-ова Таймыр;
- б) лиственничник, 105 лет в Туре, средняя тайга Вост. Сибири. Резервуары – гС/м<sup>2</sup>, потоки – гС/м<sup>2</sup>/год. а) C<sub>1</sub> – живое органическое вещество; б) C<sub>1</sub> – фитомасса. C<sub>2</sub> – опад, подстилка, органическое вещество корнеобитаемого слоя почвы.

Функция продуктивности растительного покрова зависит от количества фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР) и имеет общую форму:  $NPP = C_{1\phi 1}(C_1, T_a, C_a, Q)$ , в которой введена зависимость от  $Q$  – годовой суммарной ФАР. Удельную продуктивность  $\phi_1(C_1, T_a, C_a, Q)$  можно представить в виде:

$$\phi_1(C_1, T_a, C_a) = \frac{P_0}{1 + p_1 C_1} \psi_1(C_a, T_a) \psi_2(Q), \tag{1}$$

где фактор зависимости от ФАР имеет простую экспоненциальную форму с насыщением:

$$\psi_2(Q) = 1 - \exp(-\beta Q). \tag{2}$$

Фактор зависимости от фитомассы взят в простой гиперболической форме, которая при умножении на C<sub>1</sub> дает монотонную функцию с насыщением. Зависимость от приземной температуры и концентрации задается в мультипликативной форме:

$$\psi_1(T_a) = \frac{k_T (T_a - T_{min})(T_{max} - T_a)}{(T_{max} - T_{min})^2} C_a,$$

где  $T_{max}$  и  $T_{min}$  – максимальная и минимальная температуры приземного воздуха. Поток гетеротрофного дыхания характеризует интенсивность процессов разложения мертвого органического вещества. Поэтому он зависит не только от среднегодовой приземной температуры воздуха, но и от количества осадков. Зависимость от температуры опирается на экспоненциальное уравнение Аррениуса, а от осадков взят простейший обратно пропорциональный вариант:

$$\phi_2(T_a) = k_D \exp(k_a T_a) / H, \tag{3}$$

где  $H$  – годовая сумма осадков. Такая форма обусловлена тем, что чем выше количество осадков, тем больше влаги в почве и слабее процесс разложения. Фактор  $\phi_2$  действует для потока  $y_{21}$ , соответствующего разложению органических остатков.

Анализ бифуркаций равновесий делается в пространстве параметров, отвечающих величине притока МОВ в систему извне, интенсивностям ассимиляции углерода растительностью из атмосферы, стока и разложения мертвого органического вещества. Дополнительный приток мертвого органического вещества связан с особенностями зоны многолетней мерзлоты: углерод, скованный в мерзлых слоях почвы, при оттаивании способен

дать существенную добавку к обычному пулу МОВ. Эти параметры зависят от характеристик климата (среднегодовая температура, сумма осадков). Их изменение порождает перемещение модели по пространству параметров, сопровождаемое сменой устойчивости динамических режимов. Используются два сценария изменений климата RCP-26 и RCP-85 глобальной климатической модели IPSL с умеренным и экстремальным потеплением в период до 2100 г. При экстремально теплом сценарии оттаивающая мерзлота резко повышает влажность, тундра заболачивается, что сопровождается ростом эмиссии ранее захороненного в многолетнемерзлых грунтах углерода. Умеренно теплый сценарий способствует приросту живой биомассы и ускорению разложения МОВ с увеличением эмиссии углекислого газа.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке проекта «Развитие научно-образовательного Центра мониторинга климатически-активных веществ (Углерод в экосистемах: Мониторинг)» в рамках ФНТП в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы.

*Базилевич Н.И., Гребенцов О.С., Тишков А.А.,* Географические особенности структуры и функционирования экосистем. – М. Наука. 1986.

*Базилевич Н.И., Титлянова А.А.,* Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в наземных экосистемах. – Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2008.

*Ведрова Э.Ф., Плешков Ф.И., Каплунов В.Я.,* Структура органического вещества северотаежных экосистем Средней Сибири. // Лесоведение. 2002. №6. С. 3-12.

Permafrost ecosystems: Siberian larch forests. // eds. Osawa A., Zyryanova O.A., Matsuura Y., Kajimoto T., Wein R. 2010. Springer Ecological Studies series. v. 209.



**Состав живого напочвенного покрова  
и его вклад в формирование подстилки  
в лиственничных редколесьях лесотундры Средней Сибири  
(урочище Ары-Мас)**

Кривобоков Л.В.<sup>1</sup>, Мухортова Л.В.<sup>1</sup>, Бастрыкина Т.В.<sup>2</sup>, Бондарев А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
e-mail: leo\_kr@mail.ru

В высоких широтах, в так называемом гипоарктическом поясе [Юрцев, 1966], который объединяет подзоны северной тайги, лесотундры и южных кустарниковых тундр, в функционировании экосистем чрезвычайно велика роль подстилки, своеобразного верхнего органического горизонта почв, от мощности и структуры которого во многом зависит состав органического вещества и гидротермический режим мерзлотных почв. В свою очередь, состав и структура подстилки в этих экосистемах напрямую зависит от формирующего его живого напочвенного покрова (ЖНП), включающего травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярус.

Исследования проводили в урочище Ары-Мас (N 72.45°, E 101.90°), самом северном изолированном лесном массиве в высоких широтах Евразии. Участок является южным кластером Таймырского заповедника. Живой напочвенный покров лиственничных редколесий изучали на 10 пробных площадях (ПП), укосы на каждой ПП брали в 5-кратной повторности. Для сравнения собран сопоставимый материал в фитоценозах кустарниковых тундр, окружающих лиственничные редколесья.

Исследованные фитоценозы представляют собой лиственничные редколесья, образованные *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. сомкнутостью 15-20% и высотой 4-7 м. Подрост лиственницы разреженный, обычно 1-3%, высотой 0.5-2 м. Редко, обычно на южных склонах, в редколесьях представлен ярус *Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar высотой 1-2 м и сомкнутостью 30-50%. В травяно-кустарничковом ярусе сомкнутостью в среднем около 30% и высотой 20-40 см преобладают широко распространенные североазиатские гипоарктические кустарнички, меньшее участие в сложении принимают многолетние корневищные и плотнокустовые травы, в основном, граминоиды (осоки, злаки и пушицы). Мохово-лишайниковый покров сплошной (90-100%), сложен широко распространенными бореальными и гипоарктическими печеночниками и зелеными мхами, кустистые лишайники играют значительно меньшую роль. Мощность подстилки в среднем составляет 5-8 см.

Окружающие тундры по составу флоры фактически с редколесьями тождественны, структурно отличаются отсутствием древесного и кустарникового ярусов, большим участием в напочвенном покрове многолетних трав, особенно осок и пушиц, меньшим проективным покрытием мохово-лишайникового покрова и более тонкой подстилкой (4-6 см). Отличия в строении ЖНП и подстилки, вероятно, можно объяснить интенсивным криогенным перемешиванием верхних горизонтов почвы, о чем свидетельствуют участки выдавленной минерализованной массы на поверхности – которые могут занимать до 10 % проективного покрытия ПП в тундре.

Более половины фитомассы живого напочвенного покрова редколесий составляют мхи (рис. 1), основной вклад дают доминанты сплошного мохово-лишайникового яруса – печеночник *Ptilidium ciliare* (L.) Hampe и зеленые мхи, такие как *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwdgr., *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt., *Dicranum sp.* Около четверти фитомассы слагают кустарнички – доминанты и содоминанты травяно-кустарничкового яруса – *Ledum palustre* L., *Vaccinium uliginosum* L., *V. vitis-idaea* L., *Cassiope tetragona* (L.) D. Don, иногда *Dryas octopetala* subsp. *incisa* Malyshev. Низкие простратные кустарники дают 8% фитомассы, в основном это *Betula nana* subsp. *exilis* (Sukaczew) Hultén и *Salix pulchra* Cham. На долю трав приходится

около 5% фитомассы, в основном ее образуют содоминанты (иногда доминанты) травяно-кустарничкового яруса, такие как *Carex ensifolia* subsp. *arctisibirica* Jurtzev, *Equisetum arvense* subsp. *boreale* (Bong.) Tolm., иногда также *Eriophorum vaginatum* L., *Arctagrostis latifolia* Griseb., *Petasites frigidus* (L.) Fr. Наименьший вклад в общую фитомассу, а также в опад, формирующий подстилку, вносят кустистые лишайники, среди которых доминируют чаще всего *Cladonia stygia* (Fr.) Ruoss и *Cetraria islandica* (L.) Ach.



**Рис 1.** Соотношение фитомассы растений различных жизненных форм в сложении живого напочвенного покрова лиственничных редколесий лесотундры.

По сравнению с лиственничными редколесьями, в окружающих их тундровых фитоценозах наблюдается несколько иное соотношение фракций ЖНП. Около трех четвертей фитомассы там составляют мхи, доля кустарничков снижается до 17%, до 7% возрастает участие травянистых многолетников, а доли кустарников и лишайников менее 1% каждой фракции. Отсутствие, пусть и разреженного, древесного полога явно оказывает влияние на состав и структуру подчиненных ярусов, и, соответственно, на структуру и мощность подстилки. Кроме того, уменьшение мощности слоя подстилки в тундре может свидетельствовать о более интенсивном криогенном перемешивании верхних горизонтов почвы (включая подстилку) по сравнению с редколесьями, чему в последних, возможно, препятствуют корневые системы лиственниц, особенно сеть толстых скелетных корней.

#### **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).

Юрцев Б.А. Гипоарктический ботанико-географический пояс и происхождение его флоры. М.: Наука, 1966. 94 с.

## Характеристика жирнокислотного состава бугристых мерзлотных торфяников Республики Коми

*Лю-Лян-Мин Е.И., Габов Д.Н., Шамрикова Е.В.*

*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар, Россия*

*e-mail: [gruzdeva.katua94@yandex.ru](mailto:gruzdeva.katua94@yandex.ru)*

Высшие (жирные) карбоновые кислоты входят в состав жиров (липидов), масел, восков, а также присутствуют в почвах в свободном виде. Наличие в клеточных мембранах почвенной микробиоты специфических (биомаркерных) жирных кислот позволяет идентифицировать различные группы почвенных микроорганизмов и определять структуру их сообществ хроматографическими методами. Необходимость применения хроматографических методов для этих целей связана с тем, что традиционные микробиологические методы не позволяют оценить полный видовой состав почвенных микроорганизмов, поскольку многие виды не культивируются на стандартных питательных средах [Stewart, 2012].

Цель исследования – разработка экспрессной методики определения жирнокислотного состава почвы методом газовой хроматографии для качественной и количественной оценки содержания почвенных микроорганизмов.

В качестве объекта исследования, выбраны торфяные мерзлотные почвы бугристо-мочажинного комплекса, расположенного на юго-востоке Большеземельской тундры в бассейне р. Сейда. Образцы почв отбирали на разных глубинах сезонно-талого слоя и многолетнемерзлых пород.

В исследуемых торфах, методом хромато-масс-спектрометрии были идентифицированы 13 биомаркерных жирных кислот (рис. 1).

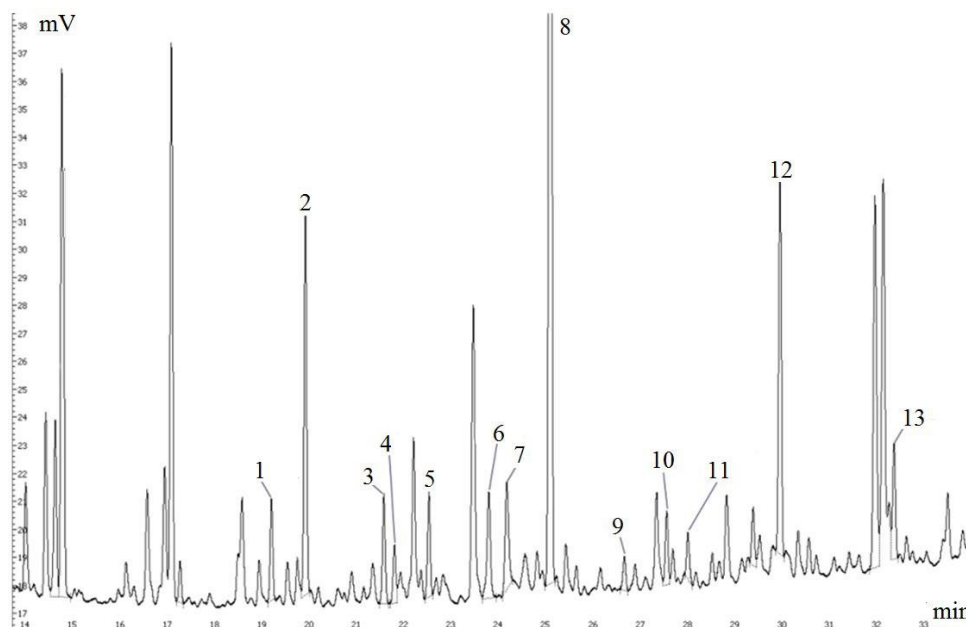
Идентифицированные кислоты были разделены на три группы [Willers, 2015]:

- маркеры грамотрицательных бактерий (3-ОН 12:0, 3-ОН 14:0, 2-ОН 16:0, су19:0);
- маркеры грамположительных бактерий (i15:0, a15:0, i16:0, i17:0);
- кислоты, характеризующие общее содержание бактерий (14:0, 15:0, 16:0, 17:0, 18:0).

Для определения биомаркерных жирных кислот в почве, разработана методика, предполагающая их извлечение, химическую модификацию, разделение и детектирование производных кислот методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным или масс-спектрометрическим детектором.

Проведена оптимизация извлечения липидов и жирных кислот из почвы по следующим параметрам: тип экстрагента, соотношение масса почвы/объем экстрагента и продолжительности экстрагирования.

На стадии проведения химической модификации часть полученного экстракта подвергается силилированию, другая – кислотному метанолизу. При взаимодействии липидов с метанолом, происходит их переэтерификация с образованием метиловых эфиров кислот, входящих в их состав. Одновременно со связанными (липидными) жирными кислотами, этерификации подвергаются и свободные жирные кислоты, которые экстрагируются из почвы вместе с липидами. Для учета свободных жирных кислот и проводится силилирование, поскольку в этом случае химической модификации подвергаются только несвязанные жирные кислоты.



**Рис. 1.** Хроматограмма этиловых эфиров жирных кислот: **1** – 3-гидрокси-додекановая кислота (3-ОН 12:0), **2** – тетрадекановая кислота (14:0), **3** – 13-метилтетрадекановая кислота (i15:0), **4** – 12-метилтетрадекановая кислота (a15:0), **5** – пентадекановая кислота (15:0), **6** – 3-гидрокси-тетрадекановая кислота (3-ОН 14:0), **7** – 14-метил-пентадекановая кислота (i16:0), **8** – гексадекановая кислота (16:0), **9** – 15-метил-гексадекановая кислота (i17:0), **10** – гептадекановая кислота (17:0), **11** – 2-гидрокси-гексадекановая кислота (2-ОН 16:0), **12** – октадекановая кислота (18:0), **13** – цис-9,10-метилен-октадекановая кислота. (cy19:0).

Диапазон измерений массовой доли жирных кислот в почве составляет от 10 до 1000 мг/кг, предел обнаружения кислот – 2 мг/кг, относительная погрешность 5-15 %, масса навески почвы – 1-2 г, общая продолжительность анализа – 4 часа.

Разработанная методика была применена для оценки содержания биомаркерных жирных кислот и характеристики микробиоты по горизонтам торфяной почвы. Общая численность бактерий в торфяных почвах, в зависимости от горизонта (10-70 см), варьирует от 20 до 30 млрд. клеток/г, в том числе, грамотрицательных бактерий от 1,6 до 4,6 млрд. клеток/г, грамположительных – от 3,9 до 5,1 млрд. клеток/г.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Авторы выражают благодарность д.х.н. И.В. Груздеву (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН) за предоставление хромато-масс-спектрометрических данных. Работа выполнена в рамках бюджетной темы НИР № 122040600023-8.

*Stewart, E.* Growing Unculturable Bacteria. *Journal of Bacteriology*, 2012. 194, 4151. DOI:org/10.1128/JB.00345-12.  
*Willers C, Jansen van Rensburg P.J, Claassens S.* Phospholipid fatty acid profiling of microbial communities – a review of interpretations and recent applications. *Journal of Applied Microbiology*, 2015. 119, 1207. DOI:10.1111/jam.12902.

## Метод интегрального давления суспензии как альтернативный способ определения гранулометрического состава криогенных почв

*Первушина А.Н., Сулкарнаев Ф.Р., Топорков И.Н.*  
Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия  
e-mail: a.n.pervushina@utmn.ru

В арктической зоне распространены криоземы, формирование которых происходит под влиянием мерзлотных процессов. Суровые климатические условия высоких широт и слабое функционирование биоты влияют на почвообразование и распределение гранулометрических фракций [Раудина, 2015].

Гранулометрический состав – базовая количественная характеристика, используемая для описания почв, оценки дисперсности и прогнозирования почвообразовательных процессов. Он определяет другие физические и химические свойства почв, а также водно-воздушный режим [Татаринцев, 2008]. Существует несколько методов определения гранулометрического состава. В полевых условиях его определяют визуально и на ощупь в сухом и влажном состоянии. Для более точного определения гранулометрического состава используют лабораторные методы. Классическими являются седиментометрические методы анализа (СМ). Также в настоящее время распространен метод лазерной дифрактометрии (ЛД) [Юдина, 2018]. Но приведенные методы имеют свои недостатки. Повторные ручные измерения и взятие проб объемов суспензии в определенное время делает СМ методы трудоемкими и требуют квалифицированных специалистов, а каждое введение ареометра и пипетки приводит к подъему суспензии и нарушает процесс осаждения. Метод ЛД в ряде случаев занижает содержание глины, поскольку предполагает, что частицы имеют сферическую форму, поэтому глинистые частицы пластинчатой формы он принимает за крупные частицы. Метод интегрального давления суспензии (ИДС) основан на той же физической основе, что и СМ методы, но не нарушает процесс осаждения, дает непрерывное определение гранулометрического состава и не требует какого-либо упрощения [Durner, 2016].

Целью исследования было определение гранулометрического состава почвенных образцов современными методами, а именно методами ЛД и ИДС. Объектами исследования послужили суглинистые почвы с. Булашово и песчаные почвы вблизи пгт. Пангоды. Для определения гранулометрического состава почвенных образцов методом ЛД применялся анализатор Malvern Mastersizer 3000. Анализ методом ИДС проводился с помощью анализатора частиц PARIO. Результаты гранулометрического анализа (табл. 1 и табл. 2) сгруппированы в соответствии с USDA Soil Taxonomy.

Образец	ИДС			ЛД		
	Глина	Пыль	Песок	Глина	Пыль	Песок
	<2 мкм	2-50 мкм	50-2000 мкм	<2 мкм	2-50 мкм	50-2000 мкм
AU1 (0-20 см)	27,44%	45,65%	26,90%	5,06%	30,49%	64,46%
AU2 (20-40 см)	28,01%	51,88%	20,11%	13,88%	70,08%	16,04%
Гор 5 (40-60 см)	36,37%	45,22%	18,41%	11,66%	72,35%	15,99%

**Табл. 1.** Результаты гранулометрического анализа суглинистых образцов почвы с. Булашово методами ИДС и ЛД.

Метод ЛД при анализе суглинистых образцов почвы занижил содержание глинистой фракции по сравнению с методом ИДС в 5,3 раза для почвенного горизонта AU1 (0-20 см), в 2,0 и 3,1 раза для горизонтов AU2 (20-40 см) и Гор 5 (40-60 см) соответственно.

По результатам гранулометрического анализа методом ЛД горизонт AU1 (0-20 см) на основе USDA Soil Taxonomy характеризуется как опесчаненный суглинок (Sandy loam), в то же время, по результатам, полученных методом ИДС данный горизонт относится к суглинкам (Loam). Визуальная оценка и раскатывание увлажненной почвы в жгут (рис. 1) также доказывают, что горизонт AU1 (0-20 см) является суглинком.



Рис.1. Полевой метод определения гранулометрического состава почвенного горизонта AU1 (0-20 см).

Результаты гранулометрического состава песчаных почв методами ИДС и ЛД (табл. 2.) отличаются незначительно, различия варьируются в пределах 0,20–1,24%.

Образец	ИДС			ЛД		
	Глина	Пыль	Песок	Глина	Пыль	Песок
	<2 мкм	2-50 мкм	50-2000 мкм	<2 мкм	2-50 мкм	50-2000 мкм
АО руг	2,62%	7,13%	90,26%	2,42%	8,37%	89,91%
ВНФ (40 см)	0,00%	4,33%	95,67%	1,78%	5,98%	92,25%
ВНФ (60 см)	0,26%	4,94%	94,80%	1,15%	4,45%	94,25%

Табл. 2. Результаты гранулометрического анализа песчаных образцов почвы пгт. Пангоды методами ИДС и ЛД.

В связи с формированием криогенных почв в условиях многолетней мерзлоты, для их исследования важно получить точные данные гранулометрического состава. Таким образом, для анализа глинистых и суглинистых почв рекомендуется использовать метод ИДС, а для песчаных и супесчаных почв – метод ЛД.

*Раудина Т.В.* Влияние криогенных процессов на формирование профиля почв центральной части Тазовского полуострова // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2015. Том 1. № 1(1). С. 33-44.

*Татаринцев В.Л.* Гранулометрия почв юга Западной Сибири и их физическое состояние. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2008. 261 с.

*Юдина А.В.* Лазерная дифрактометрия в почвоведении: методические аспекты и диагностическое значение: диссертация ... канд. био. наук: 03.00.00. Москва. 2018. 251 с.

*Durner W., Iden S.C., G. von Unold.* The integral suspension pressure method (ISP) for preciseparticle-size analysis by gravitational sedimentation // AGU Water Resources Research, 2016, Vol. 53, P. 33-48. DOI: 10.1002/2016WR019830.

## Молекулярный состав гуминовых кислот криогенных почв дельты реки Лены

*Поляков В.И.<sup>1,2</sup>, Абакумов Е.В.<sup>2</sup>, Лодыгин Е.Д.<sup>3</sup>, Василевич Р.С.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>3</sup>*Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия  
e-mail: v.polyakov@spbu.ru*

Почвенное органическое вещество (ПОВ) является ключевым элементом, определяющим качество почвы и ее плодородие, накопление ПОВ происходит в результате трансформации органических остатков растительного происхождения [Jackson et al., 2017]. До 17% суши Земли подвержено влиянию мерзлоты, в таких условиях происходит активное накопление органического вещества в составе почвы и многолетнемерзлых пород (ММП) [Biskaborn et al., 2019]. На сегодняшний день, в почвах Арктики запасено до 1500 Пг органического углерода и около 500 Пг углерода в составе отложений едомы и дельтовых комплексах северных рек [Schiedung et al., 2022], что составляет около 60% всего почвенного углерода на планете [Köchy et al., 2015; Turetsky et al., 2020]. Большая часть углерода в составе почв и ММП представлена лабильными формами (растворенным и легко окисляемым органическим веществом), слабо разложившимися растительными остатками, а также детритом, поэтому исследование качества ПОВ является актуальной задачей современного почвоведения (Zhang and Zhou, 2018). Наиболее актуальными способами оценки состояния ПОВ являются методы химического фракционирования, а также различные виды молекулярного анализа (ядерно-магнитный резонанс, газовая и гель хроматография, спектроскопия в инфракрасном диапазоне) [Pengerud et al., 2013]. Однако учитывая роль ПОВ в условиях изменения климата, исследования органического вещества в Арктике имеет довольно фрагментарный характер. Это связано с суровыми климатическими условиями, а также сложной логистической ситуацией в Арктике. Изучение молекулярно-массового распределения гуминовых кислот (ГК) необходимо для определения их роли в процессах гумификации и консервации ПОВ в почвах подверженных влиянию криогенных процессов. Таким образом, целью данного исследования являлось исследование молекулярно-массового распределения ГК, выделенных из криогенных почв дельты реки Лены.

Объектами исследования послужили почвы и отложения едомы дельты реки Лены. Дельта р. Лены – самая крупная северная речная дельта в мире, которая расположена в полярном поясе и занимает площадь около 30000 км<sup>2</sup>. Большая часть суши дельты р. Лены характеризуется наличием многолетнемерзлых пород на глубине около 1 метра. Глубина сезонно-талого слоя на суглинистых породах может достигать 30 см в конце августа, а на породах легкого гранулометрического состава доходить до 1 метра. Изученные почвы формируются на относительно молодых участках дельты реки Лены (о. Чай-Ары, о. Буор-Хая, о. Ивовый), данные острова относительно недавно вышли из поемного процесса и формируются в условиях зональных процессов (криогенез и торфообразование). Образцы с островов Чай-Ары, Буор-Хая и Ивовый отбирались из всех почвенных горизонтов. На острове Ботуло-Сисе образцы отбирались из тундровой почвы, а также из отложений едомы. Молекулярно-массовое распределение ГК, извлеченных из почв и отложений едомы были получены методом жидкостной эксклюзионной хроматографии (гель-хроматографии). Распределение препаратов ГК по молекулярной массе (ММ) было получено на хроматографической системе АКТАbasic 10 UPS (Amersam Biosciences, Швеция) с использованием колонки Superdex™ 200 10/300 GL).

В результате исследования было выявлено, что в составе молекулярной массы гуминовых веществ преобладает фракция низкомолекулярных соединений – до 66.4 % в погребенных гумусовых горизонтах. Поверхностные и срединные почвенные горизонты

характеризуются относительно высоким содержанием высоко и среднемолекулярной фракции в составе молекулярной массы гуминовых веществ (28.8 и 35.2%, соответственно). Отмечено что содержание низкомолекулярной фракции увеличивается с глубиной и максимально в погребенных почвенных горизонтах. В молекулярной массе ГК из отложений едомы отмечено наибольшее содержание среднемолекулярной фракции, до 39.6%, что может указывать на низкие темпы трансформации органического вещества в длительномерзлых условиях. Содержание низкомолекулярной фракции в структурном составе ГК из органоминеральных отложений едомы наименьшее среди всех исследованных образцов и составляет 54.3%. Исходя из данных индекса полидисперсности, мы отметили что ГК, формирующиеся в гидроморфных почвах и отложения едомы характеризуются узким отношением средневесовой ММ (Mw) и среднечисловой ММ (Mn), что может указывать на их относительную устойчивость к динамическим процессам заморозания и оттаивания. Полученные данные расширяют имеющиеся представления о строении гуминовых кислот почв криолитозоны и указывают на активные процессы трансформации органического вещества в почвах, подверженных влиянию многолетнемерзлых пород.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование проводилось при поддержке НЦМУ «Агротехнологии будущего» договор № 075-15-2022-322 от 22.04.2022.

*Jackson R.B., Lajtha K., Crow S.E., Hugelius G., Kramer M.G., Piñeiro G.* The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities, and Biotic and Abiotic Controls. // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2017, Vol. 48, No. 1, pp. 419-45

*Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A.* Permafrost is warming at a global scale. // Nature Communications, 2019, Vol. 10. No. 1, ID 264.

*Schiedung M., Bellè S-L., Malhotra A., Abiven S.* Organic carbon stocks, quality and prediction in permafrost-affected forest soils in North Canada // CATENA, 2022, Vol. 213, ID 106194

*Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C., Anthony K.W., Olefeldt D., Schuur E.A.G.* Carbon release through abrupt permafrost thaw // Nature Geoscience, 2020, Vol. 13, No. 2, pp. 138- 143.

*Köchy M., Hiederer R., Freibauer A.* Global distribution of soil organic carbon – Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world // SOIL, 2015, Vol. 1, No. 1, pp. 351-65.

*Zhang H., Zhou Z.* Recalcitrant carbon controls the magnitude of soil organic matter mineralization in temperate forests of northern China // Forest Ecosystems, 2018, Vol. 5, No. 1, ID 17.



## Радиометрическая съемка почв в криолитозоне

*Пономарёва Т. В.<sup>1,2\*</sup>, Пономарёв Е. И.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, Красноярск, Россия*

<sup>2</sup>*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*

*\*e-mail: bashkova\_t@mail.ru*

Длительное антропогенное воздействие со стороны промышленных предприятий на севере Красноярского края наряду с глобальными изменениями климата приводят к трансформациям почв, которые проявляются и в морфологических, и в тепловых характеристиках почвенных профилей. Мониторинг таких трансформаций необходим для прогнозирования и предотвращения возможных катастрофических процессов в почвах криолитозоны. Моделирование теплового состояния почв является сложной задачей в связи с огромным количеством факторов, влияющих на тепловой баланс поверхности почвы и теплоперенос внутри нее [Ponomareva et al., 2021; Пономарева и др., 2022]. Разработка подходов оценки температурного режима почв является актуальным вопросом почвоведения.

Исследования теплового состояния почв криолитозоны проводились в Таймырском Долгано-Ненецком округе на территориях. Неоднородность геоморфологических условий на территории исследования обуславливает разнообразие типов почв, которые развиваются на почвообразующих породах суглинисто-глинистого состава, имеющих покровный характер залегания. Экспериментальный участок приурочен к слабодренированной равнине, которая сформирована ледниковыми отложениями. Ее фоновые высоты составляют 50-70 м, а уклоны – не более 1-2°. На равнине широко развиты процессы криогенеза (термокарст и мерзлотное пучение), в результате чего поверхность обрела характерное бугристое строение микрорельефа и имеет большое количество термокарстовых озер.

Исследование почв проводилось как стандартными методами полевой съемки, так и методом наземной радиометрической съемки в тепловом диапазоне. В период наибольшего оттаивания почв (август) было заложено не менее 30 почвенных разрезов, выполнено морфологическое описание, измерение температуры контактными термометрами и радиометрическая съемка почвенного профиля портативным тепловизором FLIR C1. После обработки радиометрических изображений получены тепловые портреты обследованных почв и по данным радиометрической съемки рассчитаны градиенты температуры в почвенном профиле.

В данной работе представлен тепловой портрет криозёма типичного (O-CR-C1), который сформирован на моренных суглинках. Мощность почвенного профиля составляет 40 см, органогенного горизонта – 5(7) см, мерзлота в почвенном профиле на глубине 40-50 см. Анализ тепловых портретов (рис.1) показывает, что температурное поле в почвенном профиле имеет сложную конфигурацию, изотермические поверхности в криотурбированном горизонте расположены не горизонтально, что обусловлено перемешиванием грубогумусового материала с поверхности почв и минерального субстрата нижележащих слоёв. Поскольку органическое вещество имеет отличные от минерального субстрата теплофизические свойства (теплоемкость, теплопроводность и т. д.) температура в криотурбированной части профиля почв распределяется очень неравномерно.



**Рис. 1.** Тепловой портрет фрагмента стенки почвенного разреза криозёма типичного в Норильском промышленном районе.

Изменение градиентов в мерзлом горизонте обусловлено тем, что теплопроводность мерзлых грунтов обычно на 20-30% больше, чем талых. Для разных грунтов это соотношение неодинаково и зависит от их начальной структуры, влажности и условий промерзания. С ростом влажности температуропроводность увеличивается. С понижением температуры температуропроводность грунтов возрастает, причем до минус 0,5°С очень интенсивно, затем влияние температуры становится слабым [Гаврильев, Кузьмин, 2009].

Градиенты температуры, рассчитанные по данным радиометрической съемки для профилей криозёмов, на момент исследования составляли в органическом горизонте 0,25-0,3 град/см, в криотурбированном горизонте снижаются до 0,1-0,15 град/см. В водонасыщенном надмерзлотном слое и в слое фазового перехода вода-лед градиенты резко снижались до 0,01-0,5 град/см, и затем в мерзлом горизонте увеличивались до 0,35-0,5 град/см.

Полученные результаты по структурной организации почв и конфигурации изотермических поверхностей в почвенном профиле, температурных градиентах дают возможность корректировки входных параметров для моделирования процессов теплопереноса в криогенных почвах.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 23-14-20007 «Гидротермические процессы в почвах в условиях трансформированных экосистем криолитозоны Красноярского края».

*Пономарева Т.В., Пономарев Е.И., Литвинцев К.Ю., Финников К.А., Якимов Н.Д.* Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования // Вычислительные технологии, 2022, т. 27, №3, с. 16–35. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.003.

*Ponomareva T.V.; Litvintsev K.Y.; Finnikov K.A.; Yakimov N.D.; Sentyabov A.V.; Ponomarev E.I.* Soil Temperature in Disturbed Ecosystems of Central Siberia: Remote Sensing Data and Numerical Simulation // Forests 2021, 12 (8), 994. DOI:10.3390/f12080994.

*Гаврильев Р. И., Кузьмин Г. П.* Определение теплофизических характеристик мерзлых грунтов расчетным методом // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2009. № 4.

## Моделирование температуры грунта на участках распространения субэкральных таликов Центральной Якутии на примере водосбора реки Шестаковка

*Попов С.В.<sup>1,2</sup>, Боронина А.С.<sup>2,3</sup>, Лебедева Л.С.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

<sup>3</sup>Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: sporov67@yandex.ru*

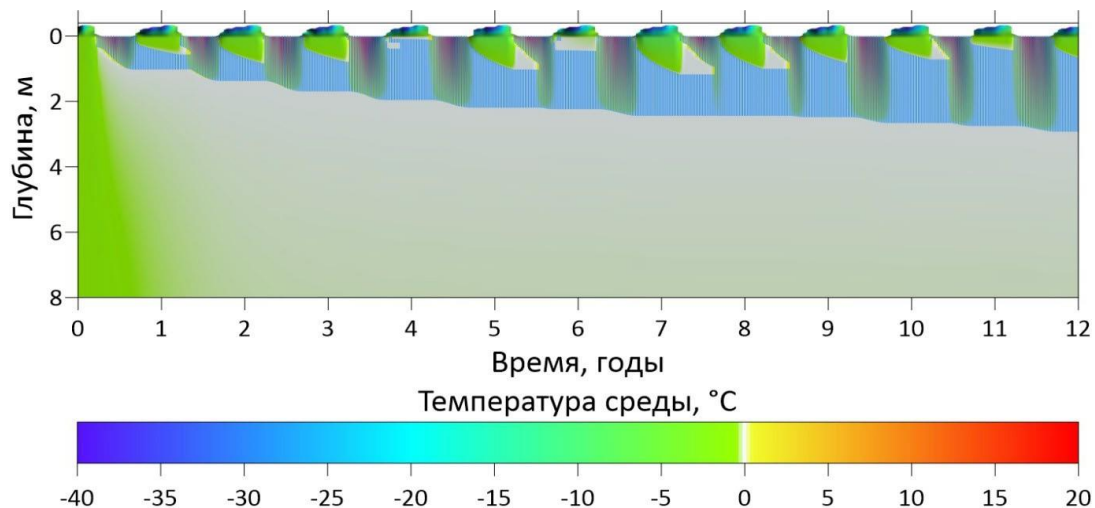
Экспериментальный участок «Левая Шестаковка» занимает территорию около 1 км<sup>2</sup> и расположен в бассейне реки Шестаковка, левого малого притока реки Лены. Климат района резко континентальный. Среднегодовая температура окружающего воздуха 2019-2020 гг. составляет -9,5°C. Многочисленные геофизические и геологические данные указывают на наличие надмерзлотных субэкральных водоносных таликов различной конфигурации (Лебедева и др., 2023). Для лучшего понимания их формирования и развития в рамках настоящей научной работы выполнено математическое моделирование. Его основу составляет решение одномерного уравнения теплопроводности, которое описывает распространение тепла в вертикальной плоскости с учётом особенностей геологического строения рассматриваемой территории [Лебедева и др., 2023], фильтрации воды в грунт и наличия снега в холодное время года. Полное описание модели приводится в публикации [Попов и др., 2022].

В настоящей работе рассматривалось несколько сценариев, которые предполагали различные типы напочвенного слоя, а также наличие и отсутствие фильтрации воды в грунт. Граничное условие на дневной поверхности задавалось теплообменом с атмосферой с учётом высоты Солнца над горизонтом, а также метеорологических данных (облачность, температура и влажность воздуха, скорость ветра и пр.), полученных на метеостанции г. Якутска [Булыгина и др., 2014]. В качестве начального условия выбрано постоянное распределение температуры по всей толщине грунта, равное -0,6°C.

В качестве примера на рис. 1 показано модельное распределение температуры верхней части геологического разреза, представленного однородным слоем песчаных отложений с постоянной влажностью 10%. Моделирование выполнялось исходя из наличия качественных метеорологических данных на сервере <http://meteo.ru/data> для периода с 1-го февраля 2008 г. по 1-е февраля 2020 г. [Булыгина и др., 2014]. В соответствии с метеонаблюдениями, датой установления устойчивого снежного покрова принято 27-е октября, а схода – 22-е апреля, при этом максимум в 33 см достигается 27-го марта. В качестве условия на нижней границе задавался средний по суше геотермический поток 54,6 мВт/м<sup>2</sup>.

Как следует из представленного рисунка, наличие снега препятствует проникновению зимнего атмосферного холода в нижележащие горные породы и, как результат, их выхолаживанию. С приходом весны снег тает, а с ним исчезает и теплоизолирующий слой. Это приводит к тому, что в песчаные отложения поступает атмосферное тепло, обусловленное солнечной радиацией, и их теплозапас повышается.

Для указанных условий субэкральный талик сформировался практически сразу, и за двенадцать модельных лет, основываясь на реальных метеорологических данных, нижняя граница многолетнемерзлых пород опустилась на 3,0 м.



**Рис. 1.** Распределение температуры в верхней части геологического разреза  
Голубой вертикальной штриховкой показана таликовая зона.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда № 22-17-20040 «Субаэральные и подозёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

*Булгыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н.* Специализированные массивы данных для климатических исследований // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2014. № 177. С. 136–148. *Лебедева Л.С., Баишев Н.Е., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М.* Температура пород в слое годовых теплооборотов в районе распространения надмерзлотных таликов в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2023. Т. XXVII. № 2. С. 3–15.

*Попов С.В., Боронина А.С., Лебедева Л.С.* Формулировка задачи и выбор методов решения для численного моделирования теплофизических процессов в водоносных субаэральные таликах // Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии», Барнаул. 2022. Т. 1. С. 214–222.

## Мультиизотопный анализ плоскобугристых болот экотона лесотундры Средней Сибири

*Прокушкин А.С.<sup>1</sup>, Новенко Е.Ю.<sup>2</sup>, Сериков С.И.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*

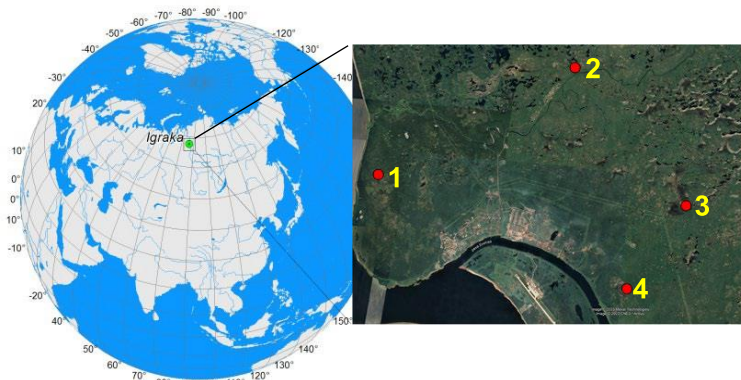
<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Игарская геокриологическая лаборатория, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Игарка, Россия*

*e-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru*

Многолетнемерзлые торфяные бугры (palsa) имеют широкое распространение в криолитозоне северного полушария [Васильчук и др., 2008]. Их ледяное ядро, образованное шлировыми льдами и линзами сегрегированного льда, развивается при миграции почвенной влаги из окружающего бугор болота и инфильтрации атмосферных осадков к фронту промерзания. Торфяная залежь палыз рассматривается как архив биогеохимических данных, отражающих условия их формирования.

Исследования плоско- и крупнобугристых торфяников проводились в районе г. Игарка (67°27' с.ш., 86°31' в.д.) на базе Игарской геокриологической лаборатории Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (рис. 1). Керны торфяных залежей были получены колонковым способом бурения в зимний период. Интервал отбора проб составлял 1-2,5 см с увеличением шага отбора до 5 см в льдистых слоях. В ходе маршрутных работ были также отобраны образцы основных растений-торфообразователей в разных экотопах по градиенту климатических условий от средней тайги до лесотундры и тундры в 6 районах Красноярского края (пп. Зотино, Тура, Туруханск, Игарка, Диксон и Хатанга).



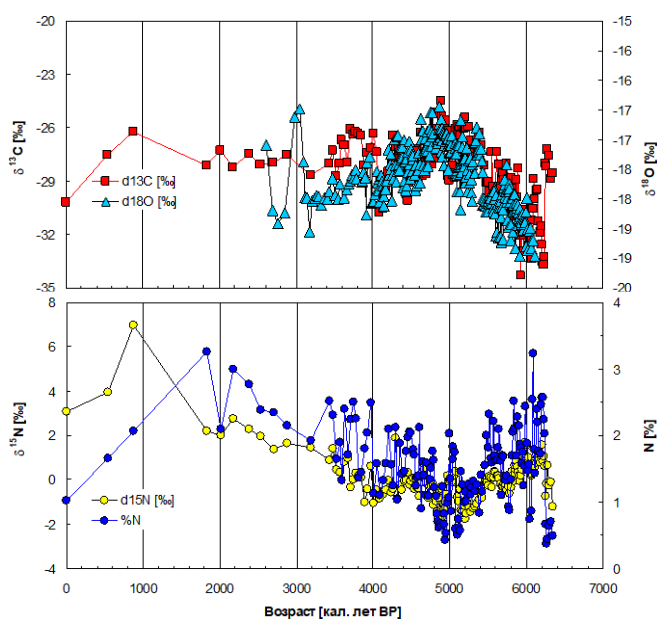
**Рис. 1.** Карта-схема расположения объектов исследования – плоско- и крупнобугристых торфяников в окрестностях г. Игарка:

1 – бассейн руч. Малая Гравийка, 2 – бассейн р. Гравийка, 3 – «Кутузовская тундра», 4 – «Лисий лог».

В образцах органического вещества торфа и растений-торфообразователей определялось содержание С и N и состав стабильных изотопов ( $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$ ) с помощью элементного анализатора TOC isotope cube (Elementar Analysensysteme GmbH, Germany), подключенного к изотопному масс-спектрометру Isoprime 100 IRMS (Isoprime Ltd., UK). Анализ изотопного состава воды ( $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ ) шлировых льдов бугров пучения и различных источников их формирования (атмосферных осадков, поверхностных, почвенных и грунтовых вод) осуществлялись на лазерном спектрометре Picarro L-2120-I.

В результате проведенных исследований состава стабильных изотопов органического вещества торфа и воды льда (рис. 2) рассматриваются взаимосвязанные аллогенные и аутогенные факторы: 1) изменения растительного сообщества, вызванные климатом и сукцессией растительного покрова, и видоспецифичное фракционирование стабильных изотопов, 2) климат, влияющий на изотопный состав воды атмосферных осадков и

поглощение  $^{13}\text{C}$  растительностью во влажные и засушливые периоды, 3) нарушения азотного цикла, вызывающие обогащение или истощение органического вещества  $^{15}\text{N}$ , 4) разложение и гумификация органического вещества, ответственное за обогащение более тяжелыми изотопами и сужение соотношения C : N и 5) процессы, опосредованные динамикой мерзлотного режима, такие как пучение и криотурбация.



**Рис. 2.** Реконструкция динамики изотопного состава ( $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$ ) и содержания азота (N) в органическом веществе торфа и воды ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в линзах сегрегированного льда в залежи «Гравийка-1».

Различные жизненные формы растений-торфообразователей (деревья, кустарники, кустарнички, травянистые растения, хвощи, мхи и лишайники) группируются в кластеры по градиенту содержания в их тканях стабильных изотопов ( $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$ ). Данный факт позволяет использовать эти параметры для определения вклада растений в формировании торфяной залежи. Не менее важным результатом исследований является выявленные изменения значений изотопного состава тканей отдельных растений в широтном направлении, что требует учета при реконструкциях палеоклимата, базирующихся на изотопном составе растений-торфообразователей.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследования выполнены в рамках Государственного задания FWES-2021-0008 и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-17-00043.

*Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н.* Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / Под редакцией действительного члена РАЕН, профессора Ю.К. Васильчука – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – 571 с.

## Биологическая активность торфяных почв севера Западной Сибири и методические особенности ее изучения

*Рязанцева М.И.<sup>1</sup>, Матышак Г.В.<sup>1</sup>, Чуванов С.В.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Почвенный институт имени В.В. Докучаева, Москва, Россия

*e-mail: ryazmasha@yandex.ru*

Одним из подходов к оценке состояния окружающей среды является исследование микробных сообществ. Они обладают высокой чувствительностью к изменениям среды, а их устойчивость позволяет во многих случаях охарактеризовать состояние почвы, в том числе и при неблагоприятных воздействиях. Существует множество методов оценки биологической активности микробных сообществ, и одним из самых простых, дешевых и распространённых является метод базального (БД) и субстрат-индуцированного дыхания (СИД) с дальнейшим расчетом биомассы почвенных микроорганизмов.

Однако помимо проведения самого анализа огромную роль играет подготовительный этап исследования – пробоподготовка образцов. Так, например, большое количество работ посвящено аспектам влияния хранения на биологическую активность минеральных почв, но существенно меньше таких работ было проведено для органогенных образцов почв, хотя и было отмечено, что почвы с высоким содержанием органического углерода более восприимчивы к хранению, чем почвы с низким его содержанием. А литературных данных по не менее важному вопросу гомогенизации органогенных почв и ее влиянию на биологическую активность практически нет. При этом общеизвестно, что репрезентативность данных при почвенно-экологических исследованиях во многом зависит от методических особенностей ее изучения.

Поэтому целью настоящей работы стало определение влияния условий и сроков хранения, а также различных типов измельчения на биологическую активность торфяных образцов на примере почв севера Западной Сибири.

Образцы отбирались с территории Надымского стационара Института криосферы Земли СО РАН (ЯНАО) в августе 2022 года. Данная территория расположена на севере Западной Сибири на северной границе распространения северной тайги и южной границе распространения тундры.

Для сравнительной характеристики исследовались два типа образцов, отобранных в пределах плоскобугристого торфяника (65°18'52.0" N, 72°52'32.5" E) с комплексом почв. Первый разрез с торфяной олиготрофной мерзлотной почвой заложен на границе плоскобугристого торфяника и ложбины стока, из которого отобран верхний горизонт ТО – желто-коричневый слаборазложённый сфагновый олиготрофный влажный торф с незначительным количеством корней. Второй разрез был заложен вверх по катене, непосредственно на плоскобугристом торфянике, и представлял собой торфяно-криозем типичный. Отобран верхний горизонт ТЕ: темно-коричневый мажущийся сильноразложённый влажноватый торф с отсутствием корней.

Эксперимент с хранением включал в себя оценку биологической активности образцов торфа методом базального дыхания (БД). Сроки хранения составляли 1, 2, 5 и 20 недель. Использовались следующие температуры хранения -20°C, -4°C, +5°C и +25°C. Также в образцах были измерены лабильные органические вещества: углерод и азот. В качестве контроля использовались данные, полученные при исследовании образцов с минимально возможным сроком хранения (3 дня).

Опыты с гомогенизацией образцов состояли в изучении воздействия разных видов измельчения на биологическую активность торфа методами базального (БД) и субстрат-индуцированного дыхания (СИД), на содержание лабильного органического углерода и азота. Измельчение производилось следующими приборами: лабораторные ножницы, 2-5 мм, лабораторный блендер фирмы Waring, тёрка бытовая, почвенная мельница фирмы

Retch. В качестве контроля взят интактный образец – образец, подвергнутый минимальному воздействию внешних факторов. Все эксперименты проведены в 3-5-кратной повторности для образцов естественной влажности.

Начальные величины БД исследованных образцов торфа разного типа значительно отличаются. Для эутрофных торфов в среднем характерны низкие величины БД, составляющие около  $\text{мкг С-СО}_2/\text{г почвы/час}$ , а для олиготрофных  $14.3 \text{ мкг С-СО}_2/\text{г почвы/час}$ . Установлено, что у эутрофных образцов с течением времени наблюдалось достоверное увеличение величины базального дыхания вплоть до пятой недели (более, чем в 2.5 раза) и его последующее снижение при долгосрочном хранении. Максимальные отличия от контрольных значений наблюдались для температуры хранения  $+25^\circ\text{C}$ . Олиготрофные образцы в краткосрочный период хранения демонстрировали аналогичные с эутрофными тенденции увеличения величины БД в 1.5 раза независимо от температуры инкубации, при этом наибольший отклик установлен для образцов, хранящихся при  $-20^\circ\text{C}$ . Содержание лабильных органических веществ (ЛОВ) сильно варьировало в зависимости от времени и температуры инкубации, но в целом имело тенденцию к увеличению во времени для олиготрофных образцов, и уменьшению для эутрофных. Максимальный отклик также отмечен для температуры  $-20^\circ\text{C}$ .

Эксперимент с гомогенизацией выявил, что наибольшее воздействие на параметры оказывает измельчение с помощью мельницы, а наименьшее – ножницами (отличие не более, чем в 1.2-1.5 раза от контрольных значений). Использование сита, терки или блендера оказывало умеренный эффект, увеличивая показатели в 2-3 раза. Также олиготрофный образец оказался более чувствительным к гомогенизации, чем эутрофный.

В результате этого, показано, что температура хранения и тип гомогенизации существенно влияют на свойства торфяных почв, эффект при этом зависит от типа торфа. Так, для эутрофных образцов наибольший эффект от хранения показывает температура  $+25^\circ\text{C}$ , в то время как для олиготрофных образцов  $-20^\circ\text{C}$ . Это может быть обусловлено как гибелью и лизисом клеток при замораживании, так и быстрым уменьшением доступных питательных элементов со временем при хранении в высоких положительных температурах. При этом выжившие микроорганизмы в дальнейшем смогут использовать не только легкодоступные вещества, высвобождаемые за счет физического разрушения клеток, но и органические субстраты, высвобождаемые из убитых микроорганизмов. Минимальный эффект на торфяные образцы при их пробоподготовке оказывает измельчение ножницами. Это может быть связано с отсутствием дополнительной нагрузки в виде давления и теплового эффекта при данной процедуре, которые, однако, присутствуют при других типах гомогенизации.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-24-00020 «Влияние влажности на биологическую активность торфяных почв криолитозоны».



## Спектроскопический индекс SUVA как маркер для оценки происхождения органического вещества в водах разного генезиса севера Западной Сибири

*Тимофеева М.В.<sup>1</sup>, Гончарова О.Ю.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Почвенный институт имени В.В. Докучаева, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*e-mail: mtimofeeva02@gmail.com*

В Арктике на всех уровнях организации экосистем сегодня наблюдаются изменения, возникающие в связи с изменяющимися климатическими параметрами, усиливающейся антропогенной нагрузкой и возможной деградацией многолетней мерзлоты [Анисимов, Ренева, 2011]. Большой запас углерода северных экосистем, находящийся непосредственно в почве и законсервированный в мерзлоте, уязвим для любых изменений климата. Деградация многолетнемерзлых пород (ММП) может изменить как величины экспорта, так и состав растворенного органического углерода (РОУ) из криогенных почв, особенно торфяных, через изменение их гидрологического режима, структуры и функционирования экосистем [Olefelt and Roulet, 2012]. Изменения количества и состава РОУ, поступающего из наземных экосистем, могут оказывать каскадное воздействие на баланс углерода в сопряженных водных экосистемах [Fellman et al., 2008], а также влиять на баланс углерода всего водосбора [Karlsson et al., 2010].

Цель работы – оценить происхождение органического вещества в водах разного генезиса севера Западной Сибири. Мы предполагаем, что гидроморфные объекты на территории островного распространения ММП являются значительным источником РОУ, а основным фактором перераспределения потоков углерода экосистемах криолитозоны на всех масштабных уровнях (от отдельных торфяников до крупных торфяно-болотных комплексов) является наличие и глубина залегания ММП.

Были изучены величины РОУ в водах основных гидроморфных экосистем севера Западной Сибири. Исследовали болотные типы экосистем – торфяно-болотные комплексы, состоящие из олиготрофных болот, сформированных в разное время и бугристых торфяников, образовавшихся среди них под влиянием процессов пучения; грядово-мочажинные болота, приуроченные к крупным ареалам стока поверхностных вод и занимающие незначительные площади. Из аквальных экосистем исследованы реки и ручьи, старичные и термокарстовые озера, а также подпертые воды – небольшие по площади водоемы, образовавшиеся в результате нарушения режима поверхностных водотоков при строительстве линейных сооружений. Для характеристики качественного состава РОУ и оценки основных источников поступления ОБ в поверхностные воды гидрохимически связанных водных объектов определен спектроскопический параметр  $SUVA_{254}$ . Удельный показатель поглощения  $SUVA_{254}$  – УФ-поглощение образца воды при длине волны 254 нм, нормированное на концентрацию РОУ. На основе этого параметра можно определить наземное ( $>3$ ) или водное (микробное или от водорослей) ( $<1.8$ ) происхождение ОБ [Weishaar et al., 2003]. Его также используют для оценки содержания ароматических соединений.

Выявлено, что изученные объекты различаются как по величинам концентрации РОУ, так и по значениям показателя  $SUVA_{254}$ . Рассчитанные значения показателя  $SUVA_{254}$  изменяются от 1.2 до 5.4 и увеличиваются в ряду озеро лесное > лесные мочажины > грядово-мочажинный комплекс > олиготрофное болото > подпертые воды > озера термокарстовые (рис. 1). Полученные величины свидетельствуют о высоком содержании в составе ОБ ароматических соединений. При этом выявлен всего один объект, происхождение ОБ которого можно определить как водное – лесное озеро.

Таким образом, генезис и состав РОВ гидроморфных объектов Западной Сибири различаются.

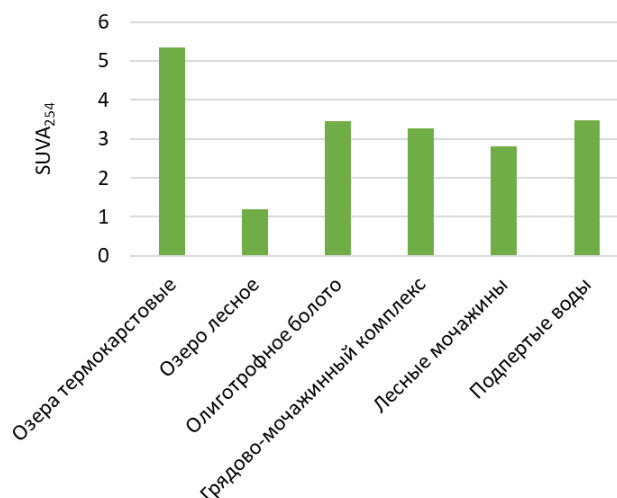


Рис. 1. Значения параметра SUVA<sub>254</sub> в водах гидроморфных экосистем севера Западной Сибири.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 22-24- 00408 «Соединения углерода в системе почва-вода-атмосфера сопряженных ландшафтов криолитозоны Западной Сибири».

*Анисимов О.А., Ренева С.А.* Углеродный баланс в криолитозоне России и глобальный климат: современное состояние и прогноз, основанный на моделировании // Полярная криосфера и воды суши. – 2011. – С. 122-139.

*Fellman J.B., Hood E., Spencer R.G.M.* Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: A review // Limnology and oceanography. – 2010. – Т. 55. – №. 6. – С. 2452-2462.

*Karlsson J. et al.* Quantifying the relative importance of lake emissions in the carbon budget of a subarctic catchment // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. – 2010. – Т. 115. – №. G3.

*Olefeldt D., Roulet N.T.* Effects of permafrost and hydrology on the composition and transport of dissolved organic carbon in a subarctic peatland complex // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. – 2012. – Т. 117. – №. G1.

*Weishaar J.L. et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon // Environmental science & technology. – 2003. – Т. 37. – №. 20. – С. 4702-4708.

## Современные методы исследования влагопроводности мерзлотных почв

*Толстыгин К.Д.<sup>1,2</sup>, Романенко К.А.<sup>2</sup>, Герке К.М.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

*e-mail: k.tolstygin@digital-core.ru*

Циклы промерзания и оттаивания являются одним из основных факторов динамики структуры порового пространства почв. Наличие вечной мерзлоты или регулярного изменения оказывает значительное влияние на влагопроводность почв. Классическая физика почв предполагает моделирование влагопроводности посредством уравнения ван Генухтена-Муалема [Шейн, Рыжова, 2016]. Однако, данное уравнение подвергается критике [Дедюлина и др., 2020], поскольку не учитывает динамику порового пространства почв, наличие в почве органического вещества, а также базируется на устаревшей концептуальной модели.

Целью данной работы является исследование влагопроводности мерзлотных почв с применением компьютерной томографии и поросетевых моделей [Valvatne, 2004]. В работе были исследованы образцы чернозема, подвергавшегося промерзанию и оттаиванию в разных степенях насыщения. На каждом этапе циклов образцы были сняты на томографе Skyscan 1272. Полученные 3D-изображения были отфильтрованы методом нахождения наименьших средних, затем отсегментированы методом наращивания регионов. Затем из каждого изображения были извлечены поросетевые модели, в которых моделировалось двухфазное течение (дренаж).

В результате удалось сравнить кривые водоудерживания (основные гидрофизические характеристики) и кривые относительных ненасыщенных гидравлических проводимостей (нормированных коэффициентов влагопроводности). Выводом является подтверждение непригодности уравнения ван Генухтена-Муалема, особенно в области макропористости. Предложены альтернативные современные методы исследования динамики структуры порового пространства и влагопроводности мерзлотных почв.

### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-74-00061.

*H. Valvatne and Martin J. Blunt. Predictive pore-scale modeling of two-phase flow in mixed wet media. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 40, W07406, doi:10.1029/2003WR002627, 2004.*

*Шейн Е.В., Рыжова И.М.. Математическое моделирование в почвоведении. Учебник.– М.: «ИП Маракушев А.Б.», 2016, – 377 с.*

*Дедюлина Е.А., Василевский П.Ю., Поздняков С.П. Чувствительность расчетов инфильтрационного питания к параметру связности пор пород зоны аэрации. Вестник Московского Университета, сер. 4. Геология. 2020. № 1.*

## Микроморфологические признаки криогенеза в почвах России вне регионов вечной мерзлоты

*Хохлова О.С.*

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино  
e-mail: olga\_004@rambler.ru*

Значительную роль в реализации многих почвообразовательных процессов и появлении определенных признаков в почвах умеренной зоны играет криогенез. В сезонно промерзающих в настоящее время или промерзавших в прошлом почвах, воздействие фазовых переходов воды в лед и обратно проявляется в выветривании и дезинтеграции первичных минералов, вследствие раскалывающего воздействия льда и тонких пленок воды, агрегированности тонкодисперсной массы, различного рода сепарациях минеральных зерен, дезинтеграции почвенных новообразований, особенностях кристаллизации вторичных минералов. Признаки перечисленных процессов очень хорошо распознаются на микроуровне изучения почв, и в длительно промерзающих или промерзавших в прошлом почвах и седиментах рассмотрены в работах Т.Д. Морозовой, В.Н. Конищева, В.В. Рогова, Е.А. Слагоды, Г.В. Русановой, М.И. Герасимовой, С.В. Губина, М.П. Вербы и мн. др. Целью данной работы является рассмотрение микроморфологических признаков, возникших вследствие процессов современного и реликтового криогенеза в почвах России, расположенных вне регионов вечной мерзлоты в настоящее время. Рассмотрены почвы, лёссово-почвенные последовательности и иногда культурные слои в Белгородской, Курской, Тульской, Вологодской, Иркутской областях.

Пример дезинтеграции зерен кварца под влиянием криогенеза встречен нами в почвах и седиментах обнажения Михайловка в Иркутской обл. Это обнажение датируется плиоценом или ранним плейстоценом, для этого периода выделяют множество эпох оледенений и межледниковий. Согласно палеогеографическому анализу, в части слоев обнажения реконструируются условия существенного криогенного воздействия (гляциальные эпохи), и именно в них отмечаются зерна кварца с четкой сетью трещин на поверхности, часто в трещинах наблюдаются затеки Fe-глинистого или другого состава. А в слоях этого обнажения, относимых к межледниковьям, зерна кварца имеют гладкую поверхность либо с минимальным количеством трещин. Полностью дезинтегрированные, расколотые на несколько частей зерна кварца встретились в Александровском карьере Курской обл. в брянской палеопочве (МИС 3), которая, как считается, долгое время после завершения брянского интерстадиала находилась на поверхности и испытала сильное криогенное воздействие в максимум валдайского оледенения. Впервые на дезинтеграцию зерен кварца под влиянием криогенных процессов обратил внимание В.В. Рогов с соавторами.

Специфическая агрегированность тонкодисперсной массы (ТДМ) в почвах, испытывающих длительное сезонное криогенное воздействие либо находившихся в условиях вечной мерзлоты в прошлом, – это так называемая ооидная микроструктура. Наиболее известные примеры – это палеопочвы брянского интерстадиала последнего валдайского оледенения, которые мы наблюдали в карьерах Курской обл. Впервые ооидные агрегаты в почвах брянского интерстадиала описала Т.Д. Морозова, подтвердила их криогенное происхождение в седиментах криолитозоны Е.А. Слагода. Ооидная агрегированность ТДМ обнаружена в нижних (>1.5 м) горизонтах современных серых лесных почв заповедника «Лес на Ворскле», Белгородская обл., в палеопочве брянского интерстадиала (МИС 3) в карьерах, Александровском и Танеевском, Курская обл. В Александровском карьере и в «Лесу на Ворскле» ооиды имели вокругагрегатные оболочки из Fe или Fe-глинистого материала. Интересный вариант ооидных агрегатов, Fe-Mn округлые стяжения в оболочке из глинисто-пылеватого тонкослоистого материала, обнаружен в верхних горизонтах дерново-подзолистых почв Вологодской обл.

О сепарациях зерен минерального скелета, связанных с движением вещества к фронту

промерзания, известно широко, и на своих объектах мы наблюдали различного рода сортировки в основном песчаного материала. В резко преобладающем ТДМ почв и седиментов обнажения Михайловка в Иркутской обл. особенно контрастно смотрятся зерна кварца песчаного размера, вытянутые почти в линию. В брянской палеопочве, расположенной на глубине свыше двух метров под профилем современного чернозема в Курской обл., отмечается своеобразное «перемятие» почвенной массы, подчеркнутое извилистыми линиями более грубодисперсного материала на фоне ТДМ. Выдавливание песчаных зерен в пустоты и формирование вокруг них вторичных Fe-глинистых пленок зафиксировано в почве микулинского межледниковья (МИС 5e) в Танеевском карьере Курской обл. В слоях лёсса часто можно встретить скопления отмытых зерен кварца и других минералов в порах и пустотах, которые, если не знать, что это лёсс, можно принять за проявление процесса оподзоливания: пример из позднечетвертичного лёсса в Александровском карьере Курской обл.

Наиболее яркий пример дезинтеграции почвенных новообразований, который мы наблюдали – это растрескивание кутан иллювиирования, дробление их на несколько частей в современных дерново-подзолистых почвах Вологодской обл., в гор. Vt, тогда как в верхней части профиля подобных нарушений не отмечается. По мнению авторов, изучавших объект, это проявление поздневалдайского криогенеза в данных почвах.

Среди множества карбонатных новообразований (КНО), которые прекрасно видны и проявляются в т.ч. на микроуровне в почвах, существуют так называемые псевдоморфозы (фитоморфозы) карбонатных минералов по растительным остаткам. Растительные остатки служат центрами кристаллизации карбонатного вещества и отчасти задают и форму КНО. Такие КНО появляются в почвах или культурных слоях только при значительном криогенном воздействии. Этот вывод был нами сделан методом исключения, поскольку большой опыт наблюдения на микроуровне за КНО в почвах аридной зоны показывает, что именно такие КНО отсутствуют в почвах, где нет или не было криогенеза. Примеры – в почвах Иркутской обл., испытывающих в настоящее сильное сезонное криогенное воздействие, и в средневековом культурном слое Тульского кремля, испытывавшем экстремально холодные для данного региона зимы в малом ледниковом периоде (16-17 вв.).

Специфические формы КНО, представляющие из себя кристаллы необычно крупного размера и формы, встречаются только в брянской интерстадиальной почве, которая, как показано во многих работах, подверглась сильному диагенетическому криогенезу в максимум валдайского оледенения. Как правило, такие КНО имеют очень характерный внешний вид, позволяющий использовать их в диагностических целях. Примеры этих КНО: Иркутская обл., почва каргинского интерстадиала (аналог брянского в Восточной Сибири); Курская обл., на глубине >2 м под современным черноземом в Казацкой степи и в Танеевском карьере.

## Обзор геофизических методов при исследовании криогенных почв

*Шейн А.Н.<sup>1,2</sup>, Позднякова Л.А.<sup>3</sup>, Манштейн Ю.А.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>*Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия*

<sup>2</sup>*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>4</sup>*ООО «КБ Электрометрии», Новосибирск, Россия*

*e-mail: A.N.Shein@yandex.ru*

Последние годы идёт активное освоение северных (и горных) территорий, разработку которых часто осложняет присутствие многолетнемёрзлых пород (ММП), которые занимают около 25% земной поверхности Северного полушария. Именно поэтому в последние годы бурно развивается научное направление по изучению современного состояния ММП и генезиса криогенных почв. Для этого разрабатываются и адаптируются методики с целью изучения почвенного покрова криолитозоны, которые ценны в том числе своей экологичностью, так как позволяют проводить измерения с поверхности, не нарушая почвенный, и во многих случаях, даже снежный покров. В данной работе мы представим некоторые из геофизических методов, которые применяются в этом направлении.

*Метод сопротивлений.* Как при изучении разреза (в шурфе), так и на поверхности часто используется метод сопротивлений в различных его модификациях. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) является универсальной почвенной характеристикой, по которой возможно определить другие почвенные свойства. Одна из модификаций метода сопротивлений – вертикальное электрическое зондирование – реализована в портативном приборе LandMapper® (ИП «ГеоПро», Landviser LLC), который давно (с 2002) и широко используется в исследованиях почв различных климатических зон. Решаются задачи по определению глубины промерзания (Golovko et al., 2021), определению морфологии и строения почв [Abakumov et al, 2016]. Другой модификацией метода сопротивлений является электротомография – более трудозатратная методика, но с автоматизированным процессом получения больших массивов данных и с возможностью визуализации 2D профилей и даже 3D моделей. Приборы Скала (ООО «КБ Электрометрии»), Syscal Pro (IRIS Instruments) и др. также успешно применяются для определения мощности и литологии почвенного покрова, свойств и строения подстилающей мерзлоты.

*Метод георадиолокации* основан на изучении разреза с помощью высокочастотных электромагнитных волн, скорость распространения которых зависит от диэлектрической проницаемости среды. Кровля ММП и участки с разной влажностью представляются для этого метода наиболее перспективными для выделения, что позволяет использовать георадиолокацию для определения глубины сезонного слоя, выделения обводнённых участков и таликов. Этот метод наименее трудоёмок по сравнению с электротомографией, но существуют ограничения по его применению в глинистых и засоленных грунтах, если они залегают с поверхности, перекрывая мерзлый слой.

*Сейсмические методы* для изучения почвенного слоя применяются редко из-за их трудоёмкости. Однако стоит отметить, что сейсмические измерения при определённых условиях позволяют однозначно идентифицировать мёрзлые участки, кроме того, есть возможность рассчитать прочностные и деформационные характеристики пород [Skvortsov et al., 2014].

Правильный выбор методики исследований и грамотный специалист-интерпретатор позволят успешно решить поставленную задачу, а наибольший эффект достигается при использовании комплекса геофизических методов.

*Abakumov E., Tomashunas V.* Electric resistivity of soils and upper permafrost layer of the Gydan Peninsula // *Polarforschung*. – 2016. – Т. 86. – №. 1. – С. 27-34.

*Golovko, L., Y.A. Manstein, A.D. Pozdnyakova, L.A. Pozdnyakov, and D.B. Romanov* Portative Sensors for Measuring Soil Electrical Parameters in Situ. // *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2021*, 267–267. <https://doi.org/10.4133/sageep.33-148>.

*Skvortsov A., Sadurtdinov M., Tsarev A.* Seismic criteria for indentifying frozen soil // *Earth`s Cryosphere*, 2014, vol. XVIII, No. 2, pp. 75–80.

**Использование естественно-научной коллекции монолитов  
тундровых и мерзлотно-таежных почв  
Почвенно-агрономического музея им. В.Р. Вильямса  
при изучении дисциплины «География почв»**

*Шмакова К.А., Зинченко А.А.*

*Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева,  
Москва, Россия  
e-mail: kshmakova@rgau-msha.ru*

Почвенно-агрономический музей имеет богатую историю, связанную с именем В.Р. Вильямса, научное творчество которого внесло большой вклад не только в отечественное почвоведение, но и мировую науку о почве. Формирование коллекции музея началось еще в 80-е годы XIX века [Поветкина, 2016]. В многочисленных поездках по стране и за рубежом В.Р. Вильямс и его ученики собирали коллекцию монолитов почв, образцов почвообразующих пород, минералов, гербарии растений и т. д. Изначально коллекция располагалась на кафедре почвоведения в двух залах. Но по мере накопления коллекционного материала встал вопрос другом размещении собранных экспонатов. По постановлению Совнаркома СССР в ознаменовании 50-летней научной и педагогической деятельности академика В.Р. Вильямса было принято решение об организации музея, который первоначально назывался музеем почвоведения и агротехники. После смерти ученого музей был переименован, ныне это Почвенно-агрономический музей имени В.Р. Вильямса. В настоящее время в музее находится 3,5 тыс. монолитов почв и более 30 тыс. рассыпных почвенных образцов. Коллекция музея демонстрирует всё многообразие почв от Северного Ледовитого океана до экватора и дает представление не только о разнообразии почв России, но и о почвенном покрове зарубежных стран [Поветкина, 2016].

Экспозиции почвенно-агрономического музея активно используются в качестве демонстрационного материала для практических занятий со студентами во время прохождения дисциплины «География почв». Одной из первых тем, которые студенты разбирают во время освоения данного предмета, является тема «Почвы Полярного почвенно-биоклиматического пояса». Музейная экспозиция почв евразийской полярной почвенно-биоклиматической области представлена во втором зале музея. Данная коллекция включает в себя 4 стенда: СТЕНД № 1 «Почвы тундры арктической и субарктической зон», СТЕНД № 3 «Почвы тундры», СТЕНД № 6 «Глеево-мерзлотно-таежные почвы», СТЕНД № 8 «Мерзлотно-таежные почвы». Экспозиция состоит из почвенных монолитов, образцов почв и гербарных экспонатов.

Все образцы на перечисленных стендах отобраны в период полевых экспедиций с 1928 по 1963 годы на территории Республик Саха, Коми, Иркутской, Магаданской областей, Ямало-Ненецкого и Чукотского автономных округов. Среди почвоведов – научных сотрудников, участвовавших в пополнении коллекции известны такие фамилии как: В.О. Таргульян, В.И. Савич, А.Д. Кашанский и др. [Наумов, 2023]).

До создания общепринятой классификации почв СССР названия почв, представленных в музее, были «авторскими». В связи с необходимостью систематизации и оцифровки музейных экспонатов с 2020 года осуществлялся проект под эгидой ФАО, позволивший обновить научно-техническую базу музея. К сожалению, полностью обновить названия почв в соответствии с классификациями 1977 и 2004 годов не удалось, что отражено в названиях почв стендов № 1,3,6,8. На данных стендах представлены: 1) глееземы криометаморфические: подтипы типичные, перегнойные, криогенно-ожелезненные, криотурбированные разного гранулометрического состава; осталось авторское название: тундровая глеевая гумусированная мерзлотно-тяжелосуглинистая; 2) торфяные болотные верховые и низинные; 3) мерзлотно-таежная подзолистая глеевая оподзоленная



тяжелосуглинистая (авторское название); 4) мерзлотно-таежная палевая оподзоленная среднесуглинистая на тяжелом суглинке; мерзлотно-таежная оподзоленная остаточнокarbonатная тяжелосуглинистая на делювии кембрийских пород (авторские названия). В целом почвы Полярного пояса, а также почвы северной тайги Бореального почвенно-биоклиматических поясов широко представлены в коллекции музея (более 40 почвенных монолитов).

Прохождение студентами курса «География почв» обязательно включает в себя работу с почвенными монолитами фондов почвенно-агрономического музея и кафедры почвоведения, геологии и ландшафтоведения РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. Такой вид практической деятельности способствует ознакомлению с почвами России и мира. Коллекция мерзлотных почв на конкретных примерах позволяет рассмотреть «продукт» процессов торфонакопления, оглеения, криогенного оструктурирования, криотурбации, термического трещинообразования. Гербарный материал дает возможность ознакомиться с основными представителями растительности тундр, их распространении и участии в почвообразовании мерзлотных почв.

Одной из форм работ с музейными монолитами является написание и защита научной работы, основанной на описании и изучении почв, представленных в коллекции. Благодаря этому студенты активно вовлекаются в процесс обучения, внимательнее рассматривают и изучают представленные объекты исследования, проявляют креативность и находчивость при защите работ. Выполнение подобных научных исследований позволяет участвовать в молодежных конференциях и конкурсах.

Дополнительный материал студенты могут найти на специально оформленном сайте Почвенно-агрономического музея (<http://3.64.51.52/web-wsm/>), где в интерактивной форме представлены карты залов, сопроводительные карточки монолитов, карта с отметками мест отбора монолитов, оцифрованные почвенные карты зарубежных стран и дана почвенно-ландшафтная характеристика к ним.

В сочетании с лекционными и семинарскими занятиями, практические занятия в музее формируют у студентов полное представление о генезисе, факторах и особенностях почвообразования, классификации и возможном сельскохозяйственном использовании почв в условиях разнообразных криогенных явлений и развития многолетней мерзлоты. Таким образом богатая коллекция монолитов тундровых и мерзлотно-таежных почв Почвенно-агрономического музея им. В.Р. Вильямса активно используется при изучении дисциплины «География почв» и смежных с ней дисциплин, таких как «Почвоведение», «Общее почвоведение», «Науки о Земле».

*Наумов, В.Д.* Тимирязевская школа почвоведов / В.Д. Наумов, Н.Л. Каменных // Агрехимический вестник. – 2023. – № 1. – С. 87-94. – DOI 10.24412/1029-2551-2023-1-014. – EDN WGQFZW.

*Поветкина, Н.Л.* Роль Почвенно-агрономического музея имени В.Р. Вильямса в формировании экологического сознания общества / Н.Л. Поветкина, А.И. Филатова, И.Н. Копейкина, А.А. Бакланова // Природа и общество: технологии обеспечения продовольственной и экологической безопасности / Под редакцией Н.О. Ковалевой, С.К. Костовска, Е.А. Борисовой. – Москва: ООО «МАКС Пресс», 2016. – С. 135-140. – EDN XBMWDD.

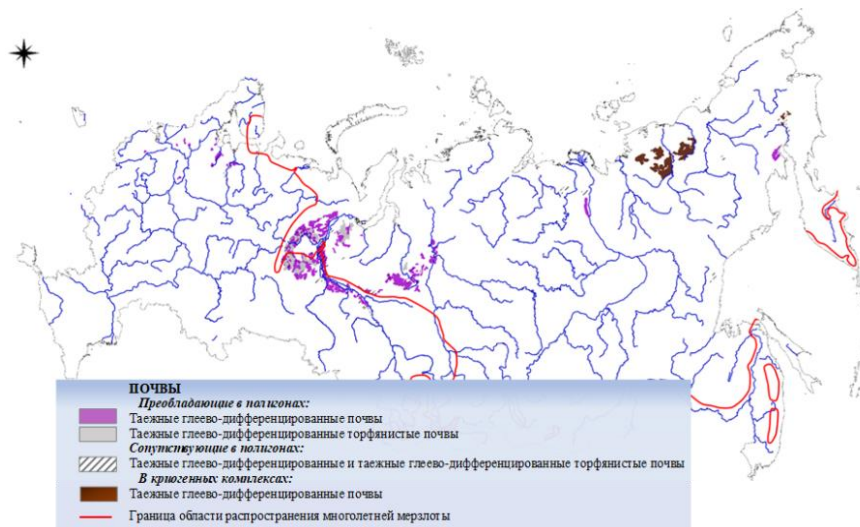
## СЕКЦИЯ 5.

# ГЕОГРАФИЯ И КАРТОГРАФИЯ КРИОГЕННЫХ ПОЧВ. ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ В ИЗУЧЕНИИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА КРИОЛИТОЗОНЫ

## Таежные глеево-дифференцированные почвы криолитозоны Почвенной карты РСФСР масштаба 1:2.5 млн в системе классификации почв России

*Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В.*  
Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия  
e-mail: anankotat@yandex.ru

Таежные глеево-дифференцированные суглинисто-глинистые почвы показаны на Почвенной карте РСФСР [ПКРФ] масштаба 1:2.5 локально в европейской России и крупными ареалами в Западной и Восточной Сибири и на Северо-Востоке России (рис.1, Fig. 1). Такая разобщенность ареалов отчасти связана с широкой трактовкой диагностических свойств почв в Программе карты (1972), а перевод почв в формат классификации почв России предполагает выявление деталей оглеения, дифференциации профиля, наличия осветленных горизонтов.



**Рис. 1.** Таежные глеево-дифференцированные почвы (таежные глееземы и слабоглеевые дифференцированные, в том числе оподзоленные) и их торфянистые аналоги в полигонах карты РСФСР масштаба 1:2.5 млн.

**Fig.1.** Taiga gley-differentiated soils (taiga gleyzems and weakly gleyic differentiated, including podzolized soils) and their peat analogues in the polygons of the Soil map of Russian Federation, scale 1:2.5M.

Проведенный анализ подтвердил, что единица легенды «таежные глеево-дифференцированные почвы» (и их торфянистые варианты) включает как почвы с простым морфологически почти недифференцированным профилем, так и почвы с осветленными горизонтами и выраженными срединными горизонтами, формирование которых связано с криогенными процессами. Признаки оглеения подтверждены во всех почвах, как и

отсутствие текстурного горизонта ВТ, что резко отделяет рассматриваемую группу почв от почв отдела текстурно-дифференцированных [Ананко и др., 2022].

В Западной Сибири – основном ареале таежных глеево-дифференцированных почв – многолетняя мерзлота имеет редкоостровное и спорадическое распространение только в северной части, сохраняясь в торфяниках; суглинки остаются тальми. Однако в многолетнем цикле возможны переходы почв от сезонно-мерзлых к длительно-сезонно-мерзлым и мерзлотным, обусловленные изменениями климата. Анализ морфологических и физико-химических свойств глеево-дифференцированных таежных почв с точки зрения их корреляции с диагностическими критериями классификации почв России показал, что в тяжелосуглинисто-глинистых почвах среднетаежного Приобья, формирующихся на выровненных слабо дренированных участках водораздельных равнин, отсутствуют диагностические срединные горизонты, а признаки оглеения выражены слабо, как и текстурная и химическая дифференциация профиля [Караваяева, 1973]. Следовательно, почвы могут быть отнесены к отделу органо-аккумулятивных – с торфяными, перегнойными или грубогумусовыми горизонтами, подтипу глееватые. В лучше дренируемых позициях: на высоких террасах, вершинах холмов и увалов в почвах формируется маломощный осветленный горизонт ЕL и срединный горизонт с хорошо выраженной криогенной икрянистой или крупитчато-мелкоореховатой структурой: почвы классифицируются как светлосемы глееватые. В случае, если верхняя часть срединного горизонта имеет яркую охристо-бурую окраску, которая выглядит как ржавая «оторочка» элювиального горизонта снизу [Караваяева, 1973], почвы относятся к сложному подтипу глееватых криогенно-ожелезненных. Ухудшение условий дренажа отражено на ПКРФ дополнением признака «торфянистые» к основному названию; в этих почвах нарастает мощность органических горизонтов до 15-20 см, усиливается оглеение, появляется массивность сложения, вязкость, тиксотропность: они переведены в торфяно-глееземы по классификации почв России.

В Восточной Сибири и на Северо-Востоке в зоне сплошной многолетней мерзлоты профиль глеево-дифференцированных таежных почв нарушен криогенными процессами мелкополигонального растрескивания, пучения, криотурбаций. В результате формируются полигонально-трещинные и неупорядоченно-пятнистые комплексы, отображенные на ПКРФ. Характерной особенностью почв Восточно-Сибирского региона, формирующихся на легких суглинках, в том числе щелнистых, является угловато-мелкокомковатая или зернистая структура срединных горизонтов [Еловская, 1979]. В сочетании с рядом других признаков, она является основанием для возможной интерпретации почв как криометаморфические грубогумусовые оподзоленные. В суглинистых почвах Северо-Востока криогенная оструктуренность выражена слабее, отмечается тиксотропность, криотурбации, надмерзлотная верховодка [Наумов, 1971], что свидетельствует об их переходном характере между криоземами глееватыми и органо-криометаморфическими глееватыми почвами. Названия всех почв содержат подтиповой признак «глееватые», что отвечает их объединению в исходной легенде.

*Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В.* Таежные глеево-дифференцированные почвы на почвенной карте РСФСР масштаба 1:2.5 млн в системе классификации почв России 2004 г. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева.* 2022;(113):5-30. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-113-5-30>.

*Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В.* Почвы Северной Якутии. Новосибирск: Изд-во Наука, Сиб. отд., 1979. 301 с.

*Караваяева Н.А.* Почвы тайги Западной Сибири. М.: Наука, 1973. 166 с.

*Наумов Е.М.* Почвы Магаданской области и их агрохимическая характеристика / Агрохимическая характеристика почв СССР. Дальний Восток. АН СССР, Почв. Ин-т им. В. В. Докучаева. М.: Наука, 1971. С. 240-313.

Программа Почвенной карты СССР м-ба 1:2.5 млн. Ред. В.М. Фридланд. М: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1972. 158 с.

## Мерзлотные условия плоскобугристых торфяников Большеземельской тундры по данным георадарного профилирования

*Воронин А. Я., Конюшков Д. Е.*

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия*

*e-mail: avoron46@gmail.com; dkonyushkov@yandex.ru*

Плоскобугристые торфяники широко распространены в Большеземельской тундре и лесотундре, встречаясь как в зоне сплошной мерзлоты, так и в более южных зонах прерывистой и островной мерзлоты. Они формируются в разных геоморфологических позициях: на высоких поймах, террасах и междуречных пространствах, занимая пониженные элементы мезорельефа с дополнительным увлажнением. Подстилающие торфяной слой отложения могут быть различного состава и генезиса: аллювиальные и флювиогляциальные пески и супеси; моренные суглинки с прослоями песков; неоднородные по составу ледниково-озерные и ледниково-морские отложения (пески и супеси с прослоями глин); характерно значительное участие песчаной фракции. Превышение торфяных бугров с плоской или слабо выпуклой вершинной частью над окружающими понижениями от первых дециметров до 2-2.5 м; преобладают бугры высотой около 1 м. Крутые склоны бугров маркируются зарослями карликовой березки, багульника. На основной поверхности бугров преобладают лишайники. В плане бугры имеют вытянутую или полукруглую форму, окаймляя понижения; соседние бугры часто соединяются между собой, образуя своеобразную извилистую «сетку». Длина бугров составляет первые метры-десятки метров, ширина – первые метры. Понижения между буграми – плоские или слабоогнутые, различного размера, обводненные, с преобладанием пушицы в наиболее обводненных местах, с участками водной поверхности, с пятнами голого торфа или с покровом угнетенных сфагновых мхов. Под дренированной поверхностью бугров льдистая мерзлота находится в торфяном слое на глубине 25–40 см (измерения в июле-начале августа); максимальная глубина оттаивания – не более 70–100 см. В понижениях верхняя граница мерзлоты резко заглубляется; при измерении щупом 1.5 м достичь ее не удалось. И бугры, и понижения сложены торфом с преобладанием сфагнума. В изученных разрезах мощность торфяного слоя на буграх превышала глубину протаивания.

При нарушениях поверхности бугров развиваются деградационные процессы: растительность отсутствует; поверхность покрыта высохшими, разбитыми криогенными процессами кусками торфа бурого или темно-коричневого цвета. Минерализация торфа приводит к постепенному понижению поверхности, при этом глубина протаивания существенно не меняется из-за низкой теплопроводности сухой "торфяной мульчи". Развитие мхов, возобновление торфообразования начинаются при заметном обводнении; фактически, часть бугра становится частью понижения. В свою очередь, в понижениях можно встретить небольшие (первые метры) выпуклые торфяные бугры, покрытые отмершим сфагновым мхом сероватого оттенка, с промерзшим центральным ядром. Они постепенно деградируют, вновь сливаясь с основной поверхностью понижений. Господствующей гипотезой генезиса плоскобугристых торфяников является эрозионно-термокарстовое расчленение древних торфяных массивов с вытаиванием решетки жильных льдов по понижениям. Предполагается возможное выпучивание бугров за счет накопления ледяных прослоев в мерзлом минеральном ядре. Существуют инструментальные данные о динамике поверхности бугров. Однако данных бурения и распределения льдистости под разными элементами плоскобугристых торфяников различных размеров и в разных геоморфологических условиях мало, что затрудняет прогноз их развития при потеплении климата. Будет ли увеличиваться площадь просадок и их обводненность? Какова нижняя граница торфяного слоя? Имеется ли слой многолетнемерзлых пород под понижениями? Имеются ли признаки сингенетичных ледяных жил в массивах плоскобугристых торфяников?

Ответы на эти вопросы мы надеялись получить с помощью георадарного

профилирования (использовался импульсный георадар Лоза-В). Представлены материалы по трем профилям: (1) плоскобугристый торфяник со слабо выраженными понижениями и невысокими (0.5 м), вытянутыми вдоль склона буграми, (2) краевая часть этого же массива с более крупными (1–1.5 м) буграми неправильной формы и обводненными, понижениями (массив в развилке между дорогами на Усинск и Красное, к востоку от Нарьян-Мара, 67°39'12"–30"N, 53°23'20" E) и (3) массив крупных (1.5 м) плоскобугристых торфяников к северу от Тишкина озера (67°36'15" N, 53°07'54" E). Все профили заложены в пределах полосы флювиогляциальных песчаных отложений. Замеры проводились через 1 м. Центральные части обводненных межбугровых понижений оказались недоступными для профилирования.

Первичный анализ радарограмм показал наличие в вертикальном профиле торфяников большого числа границ между слоями с разной диэлектрической проницаемостью. Прослеживалось резкое заглубление верхней границы мерзлого слоя торфа на переходе от бугра к понижению. В дальнейшем применяли более сложный алгоритм обработки данных, включающий осреднение сигнала методом скользящего окна, преобразование Фурье, определение спектральной плотности амплитуды сигнала, которая рассматривалась как показатель физического состояния среды. Предложены эмпирические степенные уравнения, связывающие значения спектральной плотности с физическими показателями: объемным весом, пористостью, влагоемкостью и др. Кластерный анализ полученных данных позволил выделить 8 групп слоев. Корректность их интерпретации предстоит проверить с помощью бурения. Однако ряд предварительных выводов представляется интересным.

1. Наименьшее межкластерное расстояние характерно для первого профиля, что свидетельствует об относительной однородности объекта (слабо выраженные бугры и понижения). Максимальные расстояния характерны для третьего профиля.
2. По всем профилям прослеживается граница между органометным (торфяным) слоем и подстилающими песчаными отложениями. Мощность торфа колеблется от 80 до 140 см. Характер этой границы разный – ровный под крупными буграми третьего профиля, с заглублением по понижениям и небольшими валиками по краям на втором профиле, волнистый без четкой приуроченности заглублений на первом профиле.
3. Ни в одном профиле не встречены формы, которые могли бы быть интерпретированы как сингенетичные ледяные жилы или заполнения по ним. Более характерен линзовидный характер льдистых прослоев. Льдистость минерального слоя максимальна под буграми, но не коррелирует с их высотой; минимальные значения предполагаются под крупными буграми третьего профиля, в которых промерзшим остается небольшой слой песка, подстилаемый талой (или малольдистой) толщей с отдельными сохранившимися линзами льдистой мерзлоты. Льдистая мерзлота, однако, сохраняется в средней и нижней частях торфяного слоя (на глубине 30-80 (100) см).
4. Мерзлотное состояние изученных плоскобугристых торфяников разнообразно, но в целом характеризуется деградацией мерзлоты. Значительная (>1 м) мощность торфа и его дренированность, сухость (и низкая теплопроводность) в верхнем слое на буграх являются главными факторами их устойчивости, сохранения мерзлого слоя даже при значительных колебаниях климата. Вероятно, основной путь деградации бугров – их «подтачивание» со стороны переувлажненных понижений. Густая кустарниковая растительность по периферии бугров предохраняет их от механического обрушения.

## Мониторинг полигонально-жилых структур торфяников по берегам озер на севере Пур-Тазовского междуречья

*Данько М.М.<sup>1</sup>, Хомутов А.В.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия*

<sup>2</sup>*Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия*

*e-mail: mdanko1996@mail.ru*

Последнее время в Арктике наблюдается активное развитие ряда опасных криогенных процессов в торфяниках на фоне климатических колебаний. Прогнозы изменения состояния верхней части многолетнемерзлых пород в тундре, перестройки рельефа торфяников основаны на данных дистанционного зондирования Земли. Анализ динамики развития процессов и климатических условий необходим для моделирования и прогноза дальнейшего развития этих процессов.

Дистанционный мониторинг - метод выявления закономерностей, причин и следствий развития ландшафтов и криогенных процессов на них [Хайруллин и др., 2019]. В последнее время технологии дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологии сделали большой шаг в своем развитии. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для съемки земной поверхности открыло множество возможностей для изучения и анализа криолитозоны.

Чтобы первоначально оценить распространение полигональных торфяников на Пур-Тазовском междуречье была использована мозаика World Imagery (©Esri World Imagery) из спутниковых снимков, представленная компанией Esri на основе данных компании Maxar (ранее известна как DigitalGlobe). Космические снимки высокого и сверхвысокого разрешения размещены в свободном доступе в базовой карте, которая доступна для подключения в ArcGIS Desktop. Большая часть территории России покрыта мозаикой снимков с пространственным разрешением не менее 1 м (продукт Maxar Vivid), используются снимки с аппаратов DigitalGlobe: WorldView-4, Worldview-3, WorldView-2, Worldview-1 и GeoEye-1. Территория исследования покрыта снимками не старше 2016 г. Для территории Пур-Тазовского междуречья, в самой северной части которого с 2016 г. ведутся детальные исследования полигональных торфяников, проведена детальная инвентаризация всех полигональных торфяников в зоне взаимодействия «торфяник-озеро». Отдельно учитывались все отдельные контуры массивов торфяников с характерной полигональностью рельефа, а некоторые крупные массивы, простирающиеся более чем на 5 км, учтены как несколько, в зависимости от простирания [Хомутов и др., 2022].

Сопоставление материалов БПЛА-съемки с высокдетальными космическими снимками дало представительный ряд геоинформационных материалов, что в сочетании с результатами геокриологических и криолитологических исследований, а также с первыми результатами изучения изменений в зоне взаимодействия «торфяник-озеро» [Данько и др., 2021] позволило найти подходы к разработке критериев устойчивости полигональных торфяников в этой зоне в зависимости от климатических изменений и антропогенного воздействия. На основе полученных результатов создана карта потенциальной устойчивости полигональных торфяников в зоне взаимодействия «торфяник-озеро» с учетом современных климатических изменений и антропогенного воздействия (рис. 1).

В качестве критериев разработаны коэффициенты, основанные на статистическом анализе изменений, происходящих с рельефом полигональных торфяников под воздействием климатических и антропогенных факторов.



**Рис. 1.** Фрагмент карты потенциальной устойчивости полигональных торфяников в зоне взаимодействия «торфяник-озеро» к антропогенному воздействию с учетом современных климатических изменений

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Исследование проведено при частичной финансовой поддержке РФФИ и Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научного проекта № 19-45- 890011. Методические подходы разрабатываются при выполнении работы по госзаданию № 121041600042-7.

*Данько М.М., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В.* Трансформация полигональных торфяников при взаимодействии с озерами на севере Пур-Тазовского междуречья: дистанционные и наземные методы мониторинга // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Салехард. 2021. С. 111–113.

*Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Бабкин Е.М., Бабкина Е.А., Соценко Д.Д.* Анализ изменения торфяников северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья по дистанционным и наземным данным мониторинга// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. №4. С. 54–62.

*Хомутов А.В., Королева Е.С., Данько М.М., Хайруллин Р.Р.* Полигональные торфяники севера Западной Сибири: распространение и вопросы классификации// Мониторинг в криолитозоне. Москва. 2022, С. 745-751.

## Картографирование загрязнения почв тяжелыми металлами на техногенной пустоши в Кольской Субарктике с использованием экспресс-методов

*Дворников Ю.А.<sup>1,2</sup>, Слуковская М.В.<sup>3,4</sup>, Гуринов А.Л.<sup>1,5</sup>*

<sup>1</sup>Лаборатория *Smart Urban Nature*, Российский университет дружбы народов,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Лаборатория карбомониторинга наземных экосистем, Институт физико-химических  
и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

<sup>3</sup>Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики,  
Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

<sup>4</sup>Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева,  
Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

<sup>5</sup>Лаборатория геоморфологии, Институт географии РАН, Москва, Россия  
*e-mail: ydvornikow@gmail.com*

Загрязнение тяжелыми металлами остается важной экологической проблемой, которая приводит к деградации экосистем в целом и почвенного покрова в частности. Для больших по площади территорий важным этапом для локализации вторичного загрязнения является крупномасштабное картографирование загрязнения почв, позволяющее выделить зоны, наиболее нуждающиеся в проведении работ по рекультивации.

В работе изучено распределение никеля (Ni) и меди (Cu) с использованием портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра в верхнем горизонте почв на участке техногенной пустоши в импактной зоне медно-никелевого комбината в окрестностях г. Мончегорск (Кольский полуостров). Валовые концентрации Cu и Ni были измерены в специально запланированных 508 точках отбора на территории площадью 360 га, включавшей деградированные подзолы и торфяные почвы; растительность на участке была представлена единичными деревьями.

Картографирование концентрации тяжелых металлов в верхнем слое почв для всей территории участка произведено с использованием методов цифровой почвенной картографии [Dvornikov et al., 2022]: смешанных методов пространственной интерполяции (регрессионный кригинг) с использованием большого количества предикторов (почвенный покров, геология, геоморфология). На основе полученных карт предложена схема рекультивации региона.

### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование выполнено в рамках проектов РНФ 19-77-300-12, РФФИ 19-29-05187, а также при поддержке Программы Академического Стратегического Лидерства РУДН.

Dvornikov, Y.A., Slukovskaya, M.V., Yaroslavtsev, A.M., Meshalkina, J.L., Ryazanov, A., Sarzhanov, D.A., & Vasenev, V.I. (2022): High-resolution mapping of soil pollution by Cu and Ni at a polar industrial barren using proximal and remote sensing. *Land Degradation & Development*. <https://doi.org/10.1002/ldr.4261>.

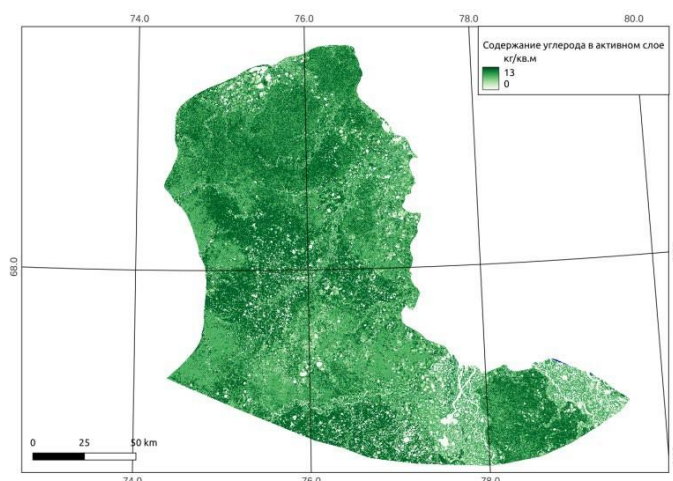


## Оценка запаса углерода в почвах Тазовского полуострова и сопредельной территории

*Заров Е.А.<sup>1</sup>, Голубятников Л.Л.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия  
<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
*e-mail: zarov.evgen@yandex.ru*

Исследуемая территория Тазовского полуострова и сопредельных территорий занимает площадь в 23 тыс. км<sup>2</sup> и расположена в пределах южной тундры Западной Сибири. Удаленность, высокий уровень заболоченности и повсеместное распространение вечной мерзлоты являются характерными особенностями данной территории. В связи с глобальным изменением климата, последствия которого наиболее сильно проявляются в северных широтах, повышение приземной температуры воздуха приводит к оттаиванию мерзлоты и увеличению деятельного горизонта почв. Таким образом, в круговорот элементов включаются новые запасы органического вещества торфа. При этом, ввиду неоднородности территории запасы углерода в почвах оценены не в достаточной мере, а исследованиями покрыта не вся площадь. Целью данной работы является оценка запаса углерода в различных ландшафтах Тазовского полуострова и сопредельных территорий в деятельном горизонте почв.

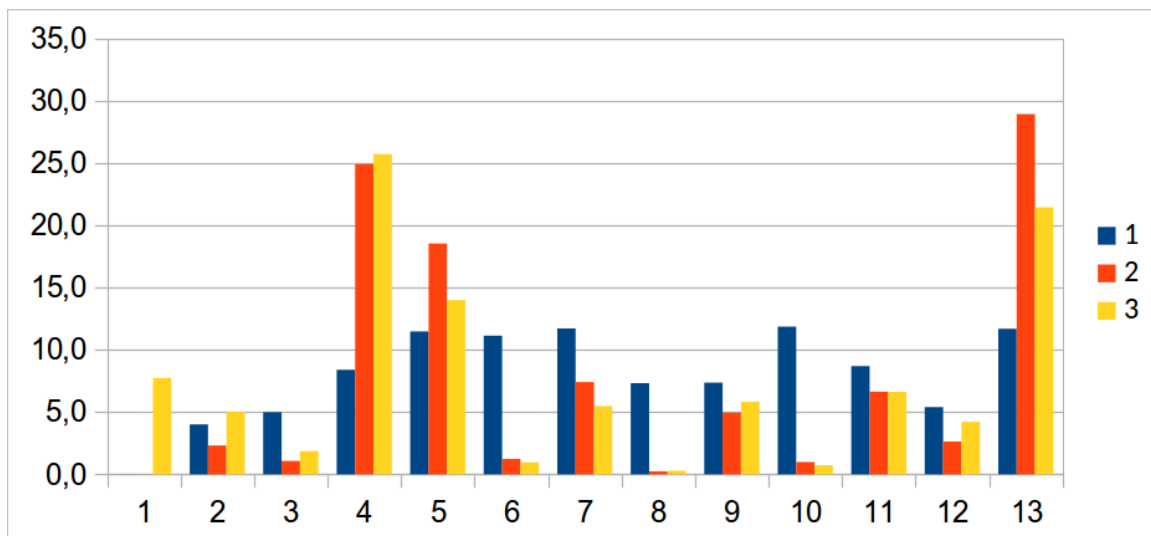


**Рис. 1.** Содержание углерода в деятельном слое исследуемой территории.

Экспедиционные выезды проходились в летний период с 2013 по 2017 годы на территории ключевого участка (67°22'N, 78°37'E). По результатам исследований были выделены ключевые ландшафты (10 единиц для ключевого участка и 13 единиц для всей исследуемой территории) и микроландшафты (20 единиц) [Zarov, 2015; Zarov et al., 2016; Zarov и др., 2022]. Для каждого микроландшафта были отобраны образцы почвы с трёх горизонтов – верхний слой (0-10 см), средний слой (10-25 см) и мерзлый слой (25-35 см). В лаборатории Югорского государственного университета почвенные образцы были высушены, измельчены; для каждого образца были определены показатель объемной плотности (отношение сухой массы к исходному объёму) и содержание углерода (элементный анализатор EuroVector EA-3000, калибровочный стандарт Atropine). Всего было проанализировано 312 образцов почвы.

На основании полученных данных для деятельного слоя каждого ландшафта было вычислено удельное содержание углерода и его пространственное распределение по исследуемой территории (рис. 1). Удельное содержание углерода для каждого ландшафта, а также доля в запасе углерода территории и занимаемой площади представлены на рисунке

(рис. 2). Как видно из рисунка, наиболее углеродоёмкими участками является Пур-Тазовский водораздел и центральная часть Тазовского полуострова - основной причиной этому является доминирование микроландшафтов ерниковые заросли (класс 4), суходол (класс 5) и бугристо-мочажинный комплекс (класс 13), содержащих наибольшее количество углерода.



**Рис. 2.** Содержание углерода в деятельном слое (1), кг/м<sup>2</sup>;

доля запасённого углерода (2),%; доля занимаемой площади (3), %.

- 1 – водная поверхность, 2 – хасырей, 3 – заболоченный хасырей, 4 – суходол с зарослями кустарников, 5 – суходол с кустарничково-травяно-лишайниковым покровом, 6 – бугристо-мочажинный комплекс (тип 1), 7 – мочажина (тип 1), 8 – мочажина (тип 2), 9 – мочажина (тип 3), 10 – территория под инфраструктурой, 11 – песчаные отложения, 12 – речные поймы, 13 – бугристо-мочажинный комплекс (тип 2).

#### 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).

*Zarov E.A., Golubyatnikov L.L., Lapshina E.D., Lойко С.В.* Растительность и почвы тундровых ландшафтов Пур-Тазовского междуречья // Изв. РАН, сер. биол. 2022. №1. С. 82-92. DOI: 10.31857/S1026347022010188.

*Zarov E.A.* The south tundra landscape structure map based on remote sensing data and field survey. // Proceedings of the 1st Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 5th PEEX Meeting, pp. 488-491.

*Zarov E.A., Golubyatnikov L.L., and Lapshina E.D.* Microlandscape structure of south tundra landscapes based on a field survey. // Proceedings of the 2nd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 6th PEEX Meeting, 2016, No. 180, pp. 590-593.

## Крупномасштабное картографирование почвенного покрова горной криолитозоны

Кулаков А. П.

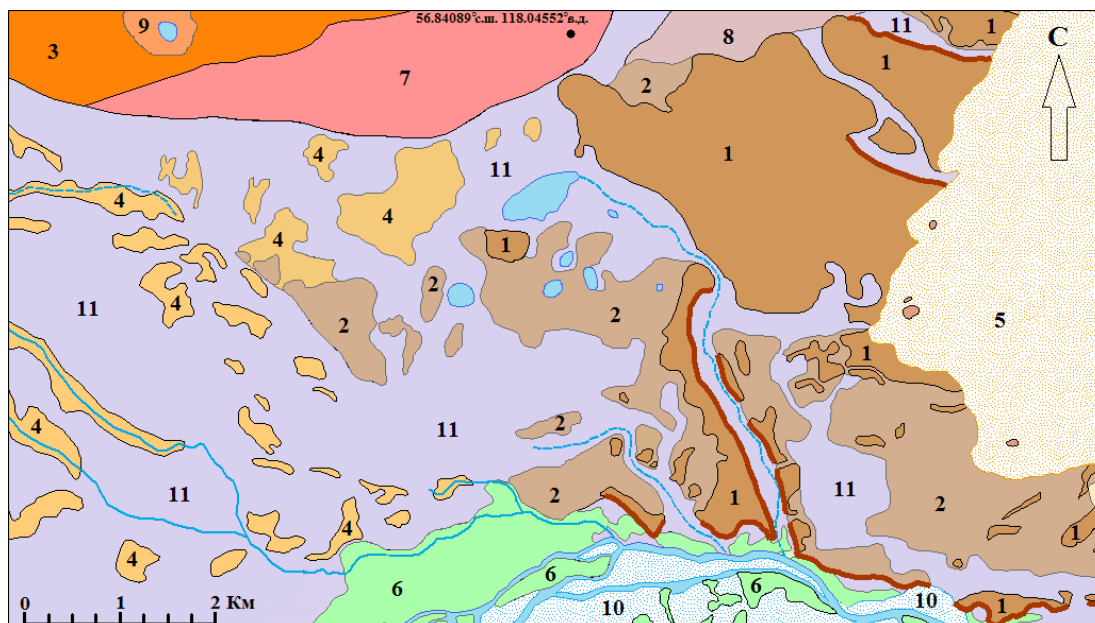
Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия

e-mail: cryolithozone@mail.ru

При освоении горной криолитозоны особенно важно учитывать дифференциацию и динамические свойства почвенного покрова в связи с возможной активизацией опасных экзогенных геологических процессов при проектировании и эксплуатации объектов инфраструктуры. В условиях горной криолитозоны почвенный покров играет одну из ключевых ролей в стабилизации многолетнемерзлых пород и развитии криогенных процессов.

В данной работе предлагается подход, основанный на крупномасштабном картографировании почвенного покрова с установлением индикационных признаков и выделением уязвимых почвенных разностей к внешним воздействиям. Картографирование осуществлялось на базе собранных полевых и дистанционных данных в пределах ключевых участков Верхнечарской горной котловины, входящей в общую систему Станового нагорья Южно-Сибирских гор. Основными показателями для выделения почвенных разностей на почвенно-экологической карте (рис. 1) и оценки их уязвимости стали строение и структура, льдистость, температура и литологический состав почвенного профиля, мощность сезонно-талого слоя, форма рельефа дневной поверхности, видовой состав растительности, а также степень и скорость проявления экзогенных геологических процессов на дневной поверхности.

К особенностям формирования почв в Верхнечарской горной котловине можно отнести высокое влияние многолетнемерзлых пород на почвообразующие процессы, выраженное в виде укороченного профиля почвенных горизонтов, малой мощности гумуса и высоким содержанием подвижного железа в почвах. Все это усложняется коротким биологическим циклом, сложным строением рельефа горной территории и грубообломочным литологическим составом поверхностных отложений. В зависимости от наличия в основании многолетнемерзлых пород на территории исследования выделяются мерзлотные и немерзлотные типы почв. Почвы немерзлотного типа преимущественно приурочены к крупным долинам с распространением таликовых зон и характеризуются широким видовым разнообразием. Мерзлотные типы почв являются доминирующими как в горной котловине, так и в соседних высокогорных условиях и формируются в условиях близкого к поверхности залегания многолетнемерзлых пород. В Верхнечарской горной котловине по особенностям осадконакопления и строения аккумулятивного рельефа преобладают шесть типов почв – подбуры, подзолистые, мерзлотно-таежные, пойменные мерзлотные, болотные и луговые мерзлотные. В зависимости от условий увлажнения, положения в рельефе и уровня мерзлотного слоя преобладают процессы ожелезнения, оглеения, торфообразования и подзолообразования. Отмечается, что процесс подзолообразования выражен очень слабо из-за широкой подавленности мерзлотными процессами, несмотря на редкое присутствие глинистых и суглинистых отложений [Михеев, 1974].



**Рис. 1.** Упрощенный фрагмент крупномасштабной почвенно-экологической карты Верхнечарской котловины (разработчик А. П. Кулаков).

**Упрощенная легенда к карте:** почвенные разности: (степень уязвимости – низкая) 1. Подзолистые слабожелезненные (текущие экзогенные процессы – линейная эрозия, суффозия); 2. Подзолистые иллювиально-железистые (линейная эрозия, суффозия); 3. Подбуры (термокарст, плоскостной смыв, солифлюкция); 4. Мерзлотно-таежные оподзоленные (линейная эрозия, суффозия, термокарст); (средняя уязвимость) 5. Пустынные песчаные (дефляция, суффозия, криогенное оползание); 6. Мерзлотно-таежные торфянисто-глеевые (пойменная аккумуляция, заболачивание, термоэрозия); 7. Мерзлотно-таежные глееватые железистые (плоскостной смыв, линейная эрозия, солифлюкция, морозное пучение); (высокая уязвимость) 8. Лугово-мерзлотно-перегонные малогумусовые (морозобойное растрескивание, заболачивание, морозное пучение, термокарст); 9. Мерзлотно-таежные глеевые торфянисто-перегонные (термокарст, заболачивание, морозобойное растрескивание, морозное пучение); 10. Мерзлотно-болотные торфянисто-глеевые (наледообразование, морозное пучение, морозобойное растрескивание, морозная сортировка, пойменная аккумуляция); 11. Мерзлотно-болотные торфяно-перегонно-глеевые (термокарст, морозобойное растрескивание, заболачивание, линейная эрозия, морозное пучение).

**Условные знаки:**  – озеро,  – постоянный водоток,  – временный водоток,  – эрозионный уступ,  – наледь,  – песчаный массив.

Наиболее уязвимые почвенные разности, малопригодные для хозяйственного освоения, сочетают в себе ледяные шпилы и вертикальные жилы, процессы оглеения и торфообразования, криотурбацию в почвенном профиле. На дневной поверхности такие участки имеют выраженные криогенные формы рельефа в виде термокарстовых западин и воронок, бугров пучения, трещин и наледей с широким распространением луговой и кустарничковой растительности (осоки, вейники, пушицы, голубики), низкорослого и угнетенного лиственничного древостоя с сухостоем и валежником.

Проведенное крупномасштабное картографирование почвенного покрова и выделение уязвимых участков позволит составить природоохранную основу для дальнейшего планирования и мониторинга хозяйственной деятельности на участках многолетнемерзлых пород при отсутствии стационарных постов в районе исследования.

*Михеев В. С.* Верхнечарская котловина: Опыт топол. изучения ландшафта. Новосибирск: Наука, 1974. 143 с.

## **К вопросу методологии оценки запасов углерода и азота в почвах южной тундры Западной Сибири**

*Кулик А.А.*

*Югорский государственный университет», НОЦ кафедры ЮНЕСКО  
«Динамика окружающей среды и глобального изменения климата», Ханты-Мансийск, Россия  
e-mail: K.ARTEM.A@yandex.ru*

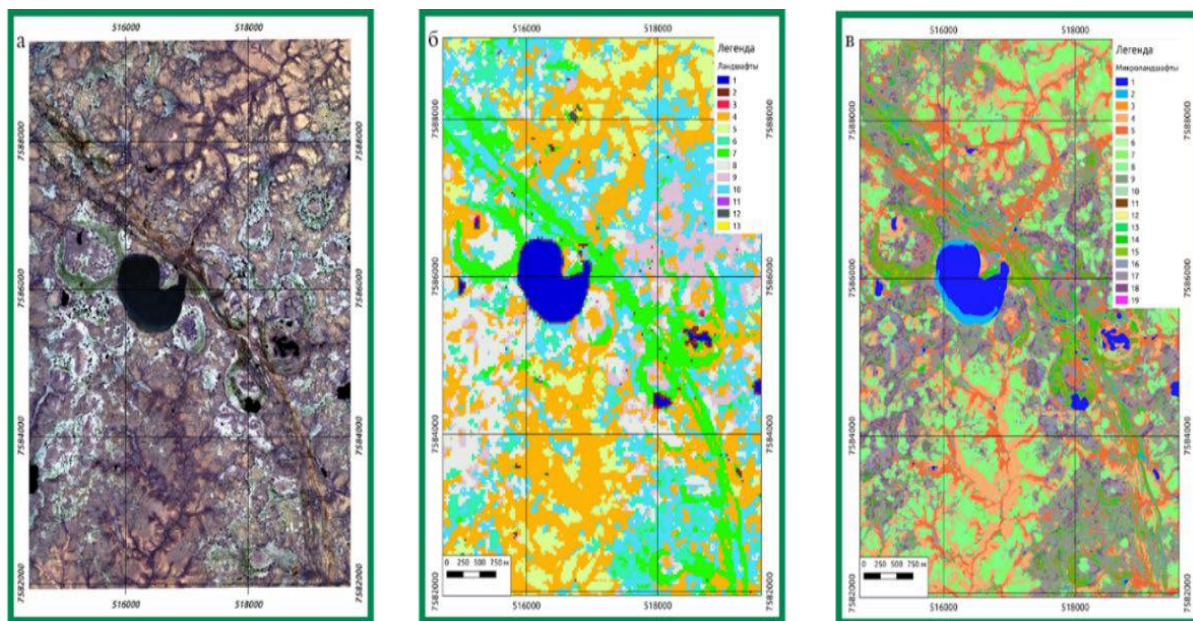
В исследовании применены данные дистанционного зондирования Земли для оценки запасов углерода и азота в почвах южной тундры. Использованы снимки спутников: LandSat-5, LandSat-8 и WorldView-2. Снимки разного разрешения предоставили более полную и точную информацию. Благодаря снимкам определены доли рассматриваемых микроландшафтов в каждом ландшафтном классе и вычислены площади каждого микроландшафта.

Данные дистанционного зондирования Земли позволяет исследовать труднодоступные и обширные регионы, такие как южная тундра Западной Сибири. Оценка запасов углерода и азота в почвах важный инструмент понимания роли территории Западно-Сибирской южной тундры в глобальном цикле этих элементов, а также для разработки эффективных стратегий управления природными ресурсами. Исследование проводилось в течение трех лет и включало работу на местности, лабораторные исследования и ГИС. Анализ ландшафтов ключевого участка происходил с использованием снимков разного пространственного разрешения. Снимки с высоким разрешением, такие как WorldView-2 (2 м на пиксель), позволяют увидеть детали ландшафта и объектов, которые могут быть незаметны на снимках с более низким разрешением, таких как LandSat (30 м на пиксель). Результаты исследования могут быть использованы для разработки более точных методов оценки запасов углерода и азота в других регионах, а также для разработки мер по сохранению и управлению природными ресурсами южной тундры Западной Сибири. В данном исследовании были использованы данные дистанционного зондирования Земли для оценки запасов углерода и азота в почвах южной тундры.

Местоположение: водосбор Пур-Таз и полуостров Таз, расположенных в биоклиматической зоне южной тундры (67°22'N, 78°37'E и 68°07'N, 75°51'E). Температура территории исследований: июль 13,5°C, январь -27,0 °C, годовая -8,5°C. Безморозный период составляет около 75 дней, а количество осадков - около 450 мм. В исследовании были использованы снимки LandSat-5 и LandSat-8, и WorldView-2.

Дешифрирование снимков и выделение классов ландшафтов земной поверхности проводилось с помощью программного пакета GRASS 6.4.3 и QGIS (Zarov, 2015). Использование снимков спутника среднего разрешения Landsat позволило выделить 11 классов тундровых ландшафтов, а точность классификации соответствует удовлетворительному уровню. Однако, более детальный анализ проводился на изображениях ключевых участков, полученных со спутника WorldView-2. Этот анализ позволил выделить 19 классов земной поверхности в южной тундре и 24 микроландшафта в типичной тундре. Водные экосистемы были подразделены на несколько микроландшафтов, включая глубоководную часть, мелководье и внутриболотные озера. Выделенные классы ландшафтов и микроландшафтов были проиллюстрированы на фрагментах снимков Landsat и WorldView-2. При сопоставлении классов ландшафтов с типами микроландшафтов были определены доли рассматриваемых микроландшафтов в каждом ландшафтном классе и вычислены площади каждого микроландшафта [Голубятников и др., 2015]. На фрагментах снимков Landsat и WorldView-2 были проиллюстрированы выделенные классы ландшафтов и микроландшафтов, показывая, что данные со спутников сверхвысокого разрешения позволяют получить более детальную ландшафтную

структуру территории по сравнению с данными, получаемыми со спутников среднего разрешения (рис. 1).



**Рис 1.** Фрагменты дешифрованных космических снимков WorldView2 (а) ключевого участка южной тундры и фрагменты дешифрованных космических снимков Landsat (б) и WorldView-2 (в) с выделенными на них классами ландшафтов и микроландшафтов для ключевого участка полуострова Таз южной тундры.

Благодаря использованию снимков разного пространственного разрешения получены более точные данные о ландшафтах и объектах исследуемой территории. Снимки с высоким разрешением, такие как WorldView-2, позволили обнаружить детали ландшафта и объектов, которые незаметны на снимках с более низким разрешением, таких как LandSat-5 и LandSat-8.

В исследуемой области площадью около 23 000 км<sup>2</sup> содержится около 282,5 млн тонн углерода и около 14,6 млн тонн азота. Большинство этого количества (40%) сконцентрировано в трех типах местности: на высокогорных территориях с кустарниками-карликами благодаря их широкому распространению, высокой плотности и относительно высокому содержанию углерода (около 18,0%) и азота (около 1,4%); на высокогорных территориях с кустарниками-карликами, лишайниками и травяным покровом благодаря их обилию на территории (14,0%); на самых влажных участках с осоковой и пушицевой травяной растительностью. 2/3 элементов запасено в сезонно талом слое, 1/3 запасена в мерзлом слое в 10 см. На данной территории количество углерода, запасенного в почве, составляет около 20,0 кг/м<sup>2</sup>, а количество азота - около 0,6 кг/м<sup>2</sup> [Заров и др., 2022].

Данные из исследования могут быть применены для оценки накопления углерода и азота экосистемами южной тундры.

*Голубятников Л.Л. и др.* Анализ структуры ландшафтов тундровой зоны Западной Сибири на основе спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. – 2015. – №. 3. – С. 4-4.

*Заров Е.А., Голубятников Л.Л., Лапина Е.Д., Лойко С.В.* Растительность и почвы тундровых ландшафтов Пур-Тазовского междуречья // Изв. РАН, сер. биол. 2022. №1. С. 82-92. DOI: 10.31857/S1026347022010188.

*Zarov E. A.* The south tundra landscape structure map based on remote sensing data and field survey // Proceedings of the 1st Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 5th PEEX Meeting. – 2015. – С. 488-491.

## Применение ДЗЗ для мониторинга овражной термоэрозии на западном побережье полуострова Ямал

*Миронова М.А., Сизов О.С.*

*РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия*

*e-mail: mta.ecology@gmail.com*

Высокая степень воздействия термоэрозионных процессов на устойчивость и деформированность инфраструктуры в условиях распространения многолетнемерзлых пород провоцирует необходимость мониторинга её состояния [Гарбеева, 2021]. В данной работе рассмотрены возможности применения данных ДЗЗ для мониторинга развития и интенсивности термоэрозионных процессов.

Объектом исследования является устойчивость строящейся инфраструктуры Харасавэйского газоконденсатного месторождения, расположенного на западном побережье полуострова Ямал. Предмет исследования - изменение интенсивности развития термоэрозионных процессов в критической близости (буфер в 10 метров) к уже построенным объектам инфраструктуры месторождения.

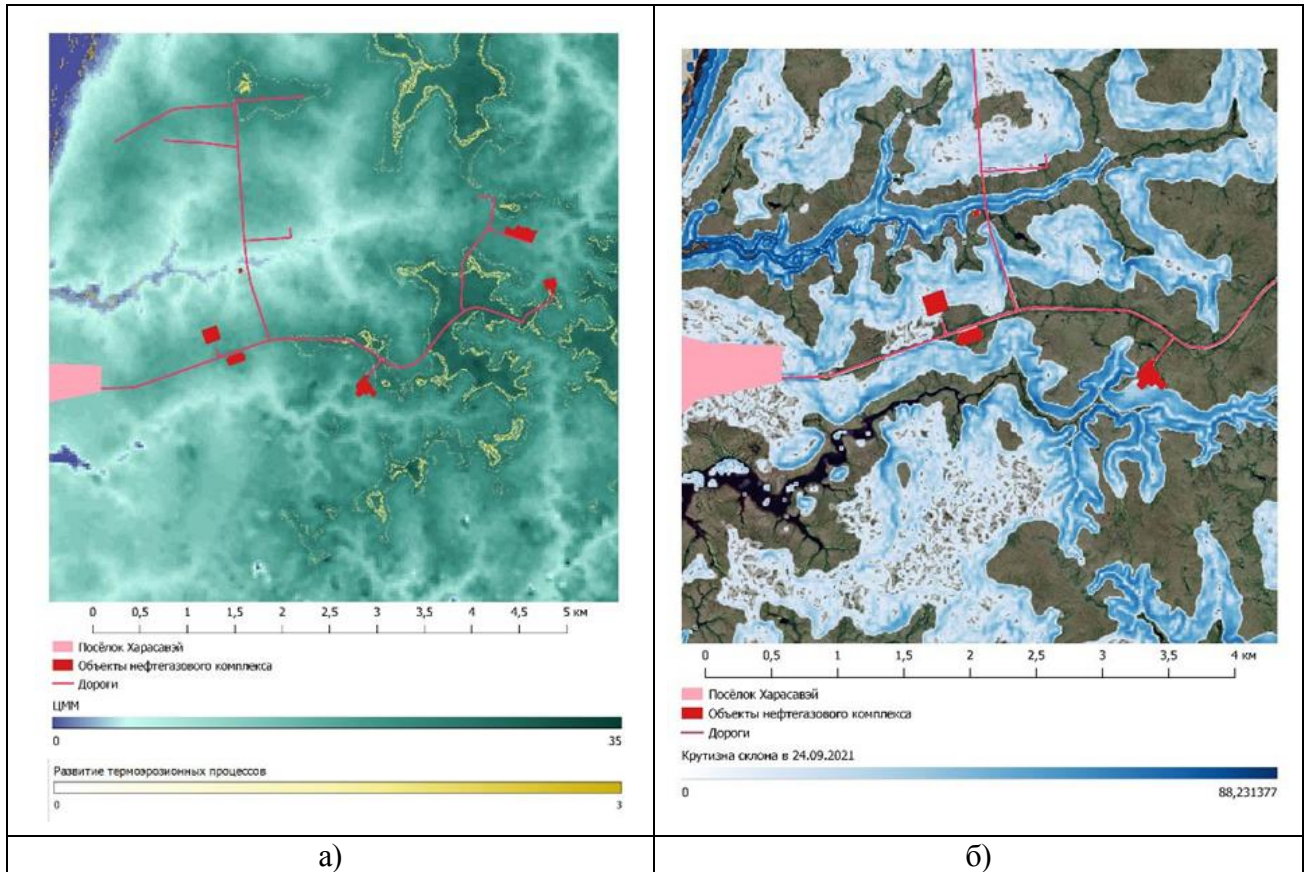
В ходе работы были получены [ESA Copernicus Open Access Hub, 2023] радиолокационные данные со спутника Sentinel-1 (ESA) за период с 2016 по 2021 гг.: период активной деятельности по обустройству месторождения. Следует отметить, что для исследования использовались сезонные данные, полученные в начале июня (период активного весеннего таяния снежного покрова) и в начале сентября (конечный результат летнего протаивания верхних слоёв многолетнемерзлых пород). Это позволило проследить максимальные ежегодные изменения. Всего были получены 298 сцен.

В данной работе использовался метод построения цифровых моделей местности с помощью интерферометрической обработки космических снимков [Боргоякова et al., 2019] для изучения развития новых форм термоэрозионного рельефа. Для обработки данных был использован программный пакет Sentinel-1 Toolbox, входящий в пакет ESA SNAP.

На основе полученных данных строились карты крутизны склонов (рис. 1 а, б), отражающие стадии развития термоэрозионных форм. По итогам исследования с 2016 по 2021 гг. площадь территории, подверженной термоэрозионным процессам, расположенным в критической близости к объектам инфраструктуры (взят буфер в 10 м от объектов) увеличилась на 203 110 м<sup>2</sup> (20,31 га).

Самые интенсивные процессы развития термоэрозионных форм рельефа приурочены к верховьям водотокам, которые на начало исследования (2016 г.) не были затронуты. Также новые эрозионные процессы хорошо прослеживаются по берегам озера расположенного западнее пос. Харасавэй. По полученным данным также прослеживается изменение и береговой линии.

Таким образом, в ходе работы с помощью данных Sentinel-1 были выделены основные параметры термоэрозионных процессов: распространение, интенсивность, изменчивость во времени. Выявлено увеличение площади, затронутой термоэрозионными процессами в критической близости к объектам инфраструктуры.



**Рис. 1.** а) Развитие термоэрозийных процессов на одном из участков месторождения в 2016 и 2021 гг.,  
б) Области потенциального развития термоэрозийных процессов.

*Боргоякова А.А., Чермошнецов А.Ю.* Методика создания цифровой модели местности по данным радиолокационной съемки со спутника Sentinel-1 // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. №2. С. 120-127.  
*Тарбеева А.М.* Мониторинг овражной термоэрозии на севере Якутии // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. №8. С. 228-234.  
*Copernicus Open Access Hub* // European Space Agency. Электронный ресурс: (<https://scihub.copernicus.eu/>), дата обращения: (24.04.2023).



## Пространственное распределение почвенных свойств на экспериментальном участке г. Салехард

*Сулейманов А.<sup>1</sup>, Низамутдинов Т.<sup>1</sup>, Моргун Е.<sup>2</sup>, Абакумов Е.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Научный центр Изучения Арктики, Салехард, Россия

e-mail: filpip@yandex.ru

Развитие сельского хозяйства в северных полярных регионах имеет потенциал в результате глобального потепления. Для расширения сельского хозяйства на севере возникает потребность в изучении качественных и количественных характеристик почв. В то же время такие исследования требуют актуальной пространственной информации о почве для планирования сельскохозяйственных мероприятий. Особенно это важно для северных районов России, где информация о почвах и почвенные карты устарели. Сегодня традиционные методы картографирования почв сменяются современными. Одним из таких подходов является геостатистика. Целью этого исследования была оценка пространственного распределения и составление карт агрохимических свойств почвы с использованием метода ординарного кригинга (ordinary kriging).

Участок исследования представляет собой заброшенное пахотное поле Ямальской сельскохозяйственной опытной станции, которое расположено в черте города Салехард (Ямало-Ненецкий автономный округ). В общей сложности было отобрано 40 образцов с глубины верхнего слоя почвы (0-10 см) и произведена географическая привязка с помощью устройства GPS. С помощью стандартных лабораторных методов [Carter, 2007] были определены значения pH H<sub>2</sub>O и органического углерода в почве (SOC). Для цифрового картографирования свойств почвы использовался метод ординарного кригинга, основной подход которого заключается в прогнозировании значений в точках без выборки на основе средневзвешенного значения наблюдаемых точек [Webster and Oliver, 2007].

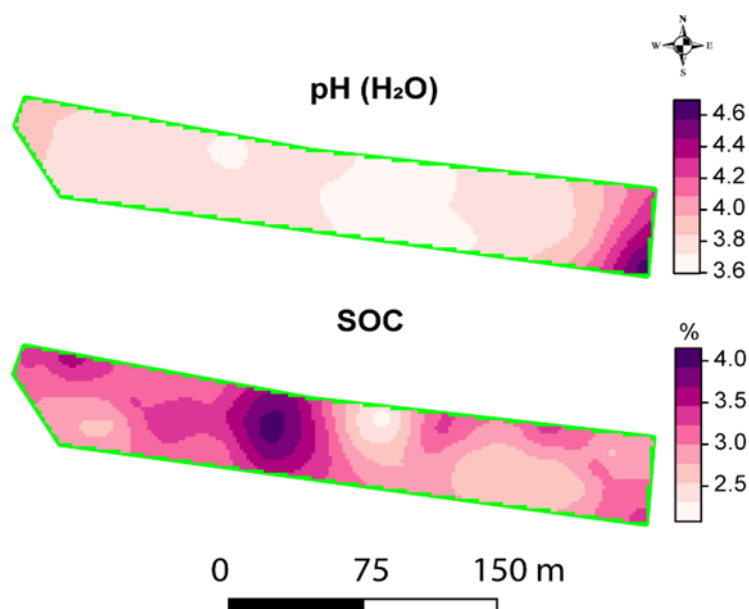


Рис. 1. Пространственное распределение почвенных свойств

Результаты пространственного моделирования pH и SOC представлены на рис. 1. Прогнозируемые значения pH почвы варьировались от 3.6 до 4.8, в то время как концентрации углерода варьировались от 2 до 4%. Распределение pH в основном однородное, с повышенными значениями в восточной части участка. Повышенные значения углерода наблюдались в западной и центральной частях. Таким образом, мы сгенерировали цифровые

карты рН и содержания углерода и оценили их пространственную изменчивость. В дальнейших исследованиях точность создаваемых карт можно повысить за счет добавления пространственных объясняющих переменных и увеличения количества образцов почвы.

**БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа была поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в соответствии с соглашением № 075-15-2022-322 от 22 апреля 2022 года путем предоставления гранта в виде субсидий из федерального бюджета Российской Федерации. Грант был предоставлен для государственной поддержки создания и развития Научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего».

*Carter M.R. and Gregorich E.G. Soil Sampling and Methods of Analysis, 2nd ed. Carter, M.R., Gregorich, E.G., Eds.;* CRC Press: Boca Raton, FL, USA. 2008.

*Webster R. and Oliver M.A. Geostatistics for Environmental Scientists, 2nd ed. John Wiley & Sons: Chichester, UK. 2007.*

## Тепловое поле как индикатор состояния техногенной трансформации экосистем криолитозоны Сибири

Сыроежко М.Ю.

Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: syroezhko.michail@gmail.com

Благодаря активному развитию арктического региона становится актуальной необходимость получения данных для оценки состояния экосистем. В настоящее время наблюдается недостаток информации по гидротермическому режиму почв криолитозоны, необходимой для моделирования и прогнозов состояния мерзлоты, которые определяют многие почвенные процессы.

Территория рассматриваемой криолитозоны относится к Норильскому плато. Согласно физико-географическому районированию, она включает в себя зоны лесотундры и северного редколесья [Севастьянов, 2014]. Почвы представлены криоземами грубогумусовыми, в том числе галееватыми, торфяно-криоземами (торфяно-криоземами глееватыми) [Пономарева, 2014].

Целью работы являлась оценка возможности применения данных реанализа спутниковых данных для получения параметров, которые можно использовать в дополнение к данным натурных исследований, метеорологических станций в местах, где отсутствует возможность получить необходимые данные путем натурных исследований. Будет изучена корреляция температуры почв на разных глубинах по данным реанализа и метеостанции на территории (Таймырского Долгано-Ненецкого округа) за июль 2010 года.

Исходные данные были получены из открытых баз данных. Ими являлись метеоданные с метеостанции (WMO ID-23078) город Норильск из базы данных сайта ООО «Расписание погоды» ([www.rp5.ru](http://www.rp5.ru)), материалы реанализа температур почв (0-10 см.) из открытого каталога Национального управления океанических и атмосферных исследований США ([www.noaa.gov](http://www.noaa.gov)), а также использовались данные температуры почв рассчитанные на основании базы данных ВНИИ ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)) гидрометеорологической информации.

Данные реанализа обрабатывались в программе QGis ([www.qgis.org](http://www.qgis.org)), и далее производился анализ полученного материала методом временных рядов. Для данных реанализа (0-10 см) и метеостанции (0-20 см) относительное отклонение было равно 23,13%.

Данные реанализа (0-10 см) по температурам почв коррелируют с данными метеостанции по температуре воздуха на уровне 2-х метров и температуре почв (0-20 см) (рис. 1).

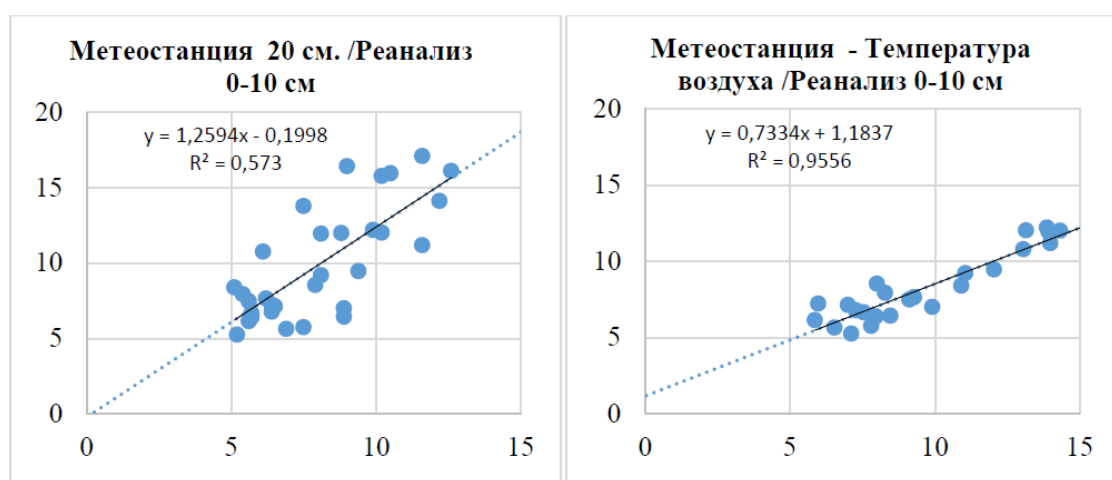


Рис. 1. Корреляция данных метеостанции и реанализа.

Результаты анализа позволили выявить относительную разницу по температуре почвы, между метеорологическими данными и реанализа. Получено время отклика почв на изменения температуры атмосферного воздуха для разных глубин. Для глубины до 10-20 см оно составило около 24 часов. Был зафиксирован коэффициент детерминации метеорологических данных и реанализа, что дает возможность сказать о возможности использования данного источника данных для дополнения недостающих метеоданных (в условиях криолитозоны).

Используя метод временных рядов и данные реанализа, можно приближенно получить картину температур поверхностного слоя почв, сравнимую с натурными исследованиями.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 23-14-20007 «Гидро-термические процессы в почвах в условиях трансформированных экосистем криолитозоны Красноярского края».

*Пономарева Т.В., Трефилова О.В., Богородская А.В., Шапченкова О.А.* Эколого-функциональная оценка состояния почв в зоне азротехногенного воздействия Норильского промышленного комплекса // Сибирский экологический журнал. 2014. №6. С. 987-996.

*Севастьянов Д.В., Исаченко Т.Е., Гук Е.Н.* Норильский регион: от природной специфики к практике освоения // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2014. №3. С.82-94.

## **Автономное почвообразование в тундровой зоне Северной Якутии: географические закономерности, классификационные аспекты, роль криогенеза**

*Фёдоров-Давыдов Д.Г.<sup>1</sup>, Лупачев А.В.<sup>1</sup>, Губин С.В.<sup>1</sup>,  
Дергачева М.И.<sup>2</sup>, Бажина Н.Л.<sup>2</sup>,*

<sup>1</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*

<sup>2</sup>*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия*

*e-mail: muss-96@yandex.ru*

Автономное тундровое почвообразование на севере Якутии изучалось нами в Колымской низменности, Яно-Индибирской низменности и на полуострове Быковском. За редким исключением оно происходит на хорошо дренируемых останцах позднеплейстоценовой аккумулятивной поверхности, сложенной породами высокольдистой едомной свиты (ледового комплекса), несущими признаки синлитогенного почвообразования. Почвообразующей породой для водораздельных почв почти всегда выступает оглеенный покровный слой свиты, представляющий собой реликт теплых и влажных эпох голоцена с большей, чем нынешняя мощностью деятельного слоя и повсеместным господством гидроморфных почв. Бугорковатый (нанополлигональный) криогенный нанорельеф на плакорах определяет структуру почвенного покрова. Современные криогенные процессы (растрескивание, пятнообразование, криотурбации, шлировое льдовыделение и др.) оказывают огромное влияние на формирование и функционирования профиля изучаемых почв.

Неравномерно проявляющееся пятнообразование обуславливает многообразие поверхностных органоаккумулятивных горизонтов. Там, где процесс проходит интенсивно, на месте пятна успевают сформироваться либо оторфованные гумусово-слаборазвитые (Wt) горизонты, либо своеобразная смесь торфа и суглинка (ТВ), а торфянистые (Т), грубогумусовые (АО) или перегнойные (Н) горизонты присутствуют лишь в периферических частях бугорка. Непрерывное простираение последние имеют в случае, когда скорость пятнообразования снижена.

Изучаемые почвы характеризуются значительной криотурбированностью. Отличительной чертой их органопрофиля является наличие включений торфоподобного органического вещества разной степени разложения, имеющих криотурбационное происхождение. Наибольшее обилие органогенных линз и прослоев наблюдается у подошвы деятельного слоя и в самой верхней части многолетней мерзлоты, где обычно формируется надмерзлотный органоаккумулятивный горизонт (CRO), по запасам углерода сопоставимый с верхней частью профиля. Погребенное в результате криотурбаций и разлагающееся в почвенной толще грубое органическое вещество выступает в качестве мощного геохимического агента, вызывающего преобразование вмещающего минерального материала в контактной зоне, часто выраженное визуально.

В большинстве автономных почв Колымской низменности сильноокислая (по величине рН КС1-вытяжки) среда при переходе от верхней к средней части профиля сменяется среднекислой. При наличии непрерывных Т, АО или Н почва обычно кислее, а смена обстановки в ней может происходить при переходе к нижней части профиля (на 32-47 см). Максимальная степень насыщения составляет 71-89%. Почвы полуострова Быковского отличаются более высокой кислотностью, что, по-видимому, связано с преобладанием мхов и лишайников в растительном покрове, а также с большим количеством осадков, в сочетании с малой мощностью деятельного слоя создающим благоприятный режим для выщелачивания оснований. Эти почвы сильноокислые по всему профилю, максимальная степень насыщения – 30-64%.

Современный тренд педогенеза повсеместно приводит к окислительной деградации голоценового глея, проявление которой неравномерно. На территории приморских

низменностей восстановленный глеевый горизонт, обычно сопряженный с CRO, вытравивает из мерзлоты лишь в наиболее теплые летние сезоны. На п-ве Быковском он является неотъемлемой частью профиля, так как его стабильность поддерживает комплекс природных факторов, включающий большее количество осадков, более тяжелый гранулометрический состав, господство мхов в растительном покрове и более слабое проявление криогенных процессов. На примере почв полуострова хорошо прослеживается, как нарастающее в ходе эволюции влияние криогенеза вызывает массообмен и оструктуривание, приводящие к нарушению исходного сложения глеевых горизонтов, их аэрации и окислению.

Отсутствие ортоглеевого горизонта, господство окислительной обстановки (415-640 мВ) в автономных почвах приморских низменностей не означает повсеместной подавленности в них процессов восстановительной мобилизации железа. Для большинства профилей характерно наличие глееватых и окисленно-глеевых горизонтов. На актуальность глея указывает совпадение его морфохромологических признаков с повышенным содержанием подвижного железа, увеличением значений критерия Швертмана, понижением величин Eh, локально фиксируемой положительной качественной реакцией на  $Fe^{2+}$ . Причины географической неоднородности масштабов глееобразования в почвах приморских низменностей выявлены не до конца. Можно утверждать, что формирование поверхностно глеевых горизонтов происходит в профилях с непрерывно выраженными T или AO. Глубинное оглеение чаще отмечается в почвах с более тяжелым гранулометрическим составом и низкой структурностью. В пределах Колымской низменности доля неоглеенных горизонтов в профиле изменяется от 0,68-0,72 для большинства исследованных ключевых участков до 0,24 в точке на правом берегу Каменной Колымы. В автономных почвах западной части Колымской н-ти и Яно-Индибирской н-ти оглеение выражено значительно лучше. Обилие и контрастность глеевых морфонов в профиле здесь выше, а доля неоглеенных горизонтов составляет всего 0,12-0,18.

В ряде исследованных почв наблюдаются признаки профильной дифференциации в виде выноса валовых форм железа, алюминия, магния и марганца из верхних горизонтов. При этом во всех случаях имеет место обезжелезнение периодически вытравивающего надмерзлотного глеевого горизонта, при отсутствии потери алюминия.

Неоднородность климатических условий в пределах изучаемой территории находит отражение в целом ряде показателей почвенного гумуса. На степень континентальности климата, прежде всего, реагирует молярное соотношение Н/С в составе гуминовой кислоты, которое расширяется в направлении от наиболее континентальной точки в бассейне р. Алазеи ( $1,07 \pm 0,11$ ) до умеренно континентального Быковского полуострова ( $1,49 \pm 0,05$ ).

Вопрос о классификационном положении автономных тундровых почв Якутии нельзя считать окончательно решенным. Если неоглеенные и слабооглеенные разности на Колымской низменности однозначно могут быть отнесены к криоземам (криогидроморфным неглеевым почвам), а почвы Быковского полуострова, имеющие в профиле восстановленный глеевый горизонт, - к глееземам, то основная морфологически весьма разнородная масса почв Колымской и Яно-Индибирской низменностей представляет собой целую серию переходных вариантов между этими двумя типами, критерии разделения которых еще предстоит разработать и обосновать.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена в рамках госзаданий ИФХиБПП РАН №122040500038-3 и ИПА СО РАН.

## **Почвы криолитозоны равнинных участков газотранспортной системы Бованенково – С.-Петербург: картографирование рисков при освоении**

*Федорова К.Т., Саприн С.В., Быкова М.В.*

*Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия  
e-mail: kfedorova2001@mail.ru*

Газотранспортная система (ГТС) Российской Федерации – важный стратегический хозяйственный объект государства. Одним из значимых требований к её функционированию – обеспечение надежности всех составляющих, снижение рисков природно-техногенного характера при строительстве и эксплуатации. К числу этих рисков в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП) – криолитозоне – относятся риски развития экзогенных процессов.

Объектом исследования явились два равнинных участка ГТС Бованенково – Санкт-Петербург, приуроченных к криолитозоне. Один из них расположен в азиатской части («участок А») и проходит близ западного побережья п-ва Ямал по плоской поверхности морских террас, другой – в европейской части («участок Е») и проходит вдоль Уральских гор (Полярный Урал) по более расчлененным высоким равнинам Большеземельской тундры. ММП обоих участков относятся к зоне сплошного их распространения, лишь южная часть участка Е – к зоне прерывистого.

Для проведения исследований хозяйствующей организацией были предоставлены следующие материалы: карта почв для коридора ГТС М 1:200000, разрозненные данные по инженерно-геологическим изысканиям, температурные замеры по режимным скважинам, проводимые в рамках геотехнического мониторинга.

Целью исследования являлось построение для этих участков карты потенциала развития деструктивных процессов М 1:200000 с последующей разработкой рекомендаций по расширению программы геотехнического (производственного) мониторинга. Для этого проведена обработка дистанционных данных по участкам, выявлена связь в системе почвы-растительность-ландшафты- особенности ММП, построена ландшафтно-индикационная таблица. Как результат, индикационные свойства почв позволили разработать карту потенциала развития деструктивных экзогенных процессов.

В ландшафтном отношении участки относятся к подзоне южной кустарниковой тундры, южная часть участка Е – к подзоне северной лесотундры. Всего выделено 26 урочищ и их объединенных групп.

Фоновым можно считать комплекс тундровых иллювиально-гумусовых оподзоленных и тундровых иллювиально-гумусовых оподзоленных сухоторфянистых почв (Тиг), развитых в урочищах тундр, преимущественно кустарничково-травяно-мохово- лишайниковых с ивой и ерником. Они сочетаются на участке А с тундровыми торфянисто- и торфяно-глеевыми (мерзлотными) почвами (Тбм), а на участке Е еще и с тундровыми торфянисто- и торфяно-глеевыми (Тб).

По долинам ручьев и рек почвы аллювиальные.

В южной лесотундре под редколесьями березово-еловыми и елово-березовыми с мозаичным зеленомошным и кустарничковым покровом развит комплекс глее- подзолистых пропитанно-гумусовых и глее-подзолистых пропитанно-гумусовых сухоторфянистых (Пгпг), местами с сочетанием тундровых глеевых (Тпг), тундровых остаточных-глеевых карбонатных и тундровых торфянисто-глеевых (Тб1).

Механический состав почв преимущественно супесчано-суглинистый, реже песчаный; суммарная влажность – преимущественно до 0,2, реже – 0,4 дол. ед.

Деструктивные экзогенные процессы (речная эрозия) фиксируются в долинах рек, на других участках экзогенные процессы нельзя считать деструктивными (кочко- и пятнообразование, сезонное пучение и т.п.).

Наиболее значимые деструктивные процессы (многолетнее пучение, термокарст) характерны для участков болот и торфяников, особенно полигональных. Для этих урочищ характерны почвы преимущественно торфяникового состава с высокими значениями суммарной влажности (преимущественно более 0,4 дол. ед.): тундровые мерзлотные торфяно-болотные (Бвм), комплекс болотных верховых мерзлотных и тундровых остаточно-торфяных мерзлотных (БвмТмот), торфяно-глеевые (мерзлотные) (Тбм),

Промежуточное значение занимают участки, где наблюдается сложное сочетание урочищ этих двух типов с незначительным преобладанием первых.

При составлении карты в легенде отражены те позиции, которые позволяют в принципе оценить возможность и интенсивность развития экзогенных процессов [Тумель, Зотова, 2014]. Прежде всего, в общем виде интенсивность их проявления зависит от почвы и её механического состава, влажности, типа ММП по вертикальному строению (сливающиеся и несЛИвающиеся), а также общий температурный фон ММП.

Все эти параметры сгруппированы с точки зрения потенциала развития деструктивных экзогенных процессов на незначимые (категория 0, процессы идут, но их нельзя определять как деструктивные); малозначимые (категория 1 – малая вероятность развития деструктивных экзогенных процессов или их развитие на незначительных площадях) и значимые (категория 2 – высокая вероятность развития деструктивных экзогенных процессов). Использован светофорный принцип показа. Первая категория показана зелеными цветами, интенсивность окраса увеличивается при приближении температур грунта к 0°C, вторая – бежевыми и желтыми по тому же принципу, третья – розово-красными. Таким образом, наиболее значимые проявления деструктивных экзогенных процессов следует ожидать на контурах красного цвета. Им соответствуют урочища преимущественно на почвах Бвм, Тбм, БвмТмот, представленных поверхности торфяными и торфяно-суглинистыми грунтами с влажностью более 0,4 дол. ед. либо их группы, где наблюдается сочетание участков органических и минеральных грунтов.

В целом геокриологические условия менее благоприятны для строительства на участке А: широкое развитие подземных льдов разного типа, преимущественно высокольдистые приповерхностные горизонты. Всё это способствует потенциальной активизации криогенных процессов. Сдерживающим фактором являются сравнительно низкие температуры ММП. Для участка Е характерно преобладание почв с невысокими значениями влажности, потенциал развития термокарста и многолетнего пучения невелик, проявляется в центральной части участка. Современные экзогенные процессы опосредованно связаны с ММП, в основном это эрозия по долинам рек и ручьев. Однако, ММП высокотемпературные практически везде (за исключением торфяников), находятся в верхней своей части в аградационной стадии развития.

При дополнении программы геотехнического мониторинга особое внимание необходимо обратить на участки категории 2. Помимо температурных исследований и инструментальных измерений отметок поверхности необходим ежегодный анализ позднелетних космоснимков для выявления новых площадей активизации экзогенных процессов.

*Тумель Н.В., Зотова Л.И.* Геоэкология криолитозоны: Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2014. 244 с.



## Динамика теплового поля техногенно-трансформированных участков золоторудных месторождений арктической зоны по спутниковым данным

*Якимов Н. Д.<sup>1,3</sup>, Пономарева Т.В.<sup>2,3</sup>, Пономарев Е.И.<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>*Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр» СО РАН,  
Красноярск, Россия,*

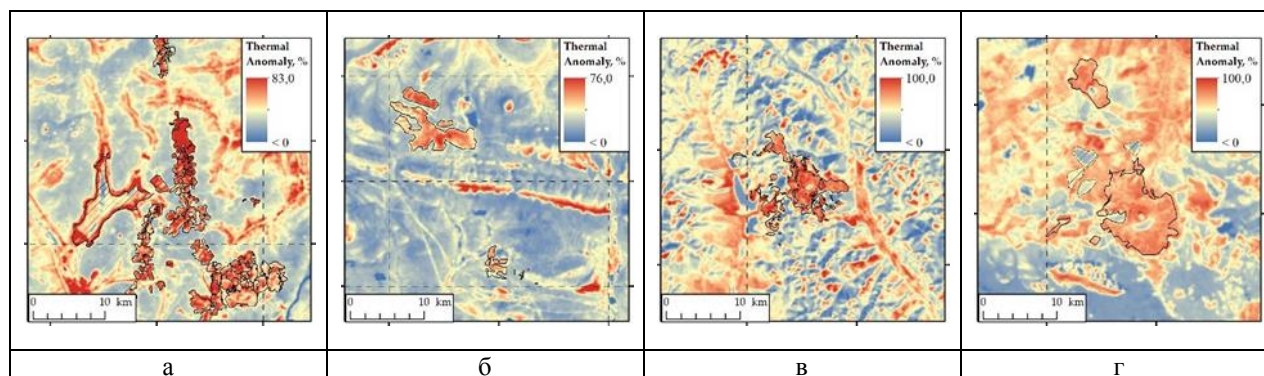
<sup>2</sup>*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*

<sup>3</sup>*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия  
e-mail: nyakimov96@mail.ru*

В мировой практике использование спутниковых средств и спектральных индексов для мониторинга состояния территорий, в частности криолитозоны, является одним из наиболее важных направлений тематического анализа. Периодическая спутниковая съемка и вычисляемые на основе ее инвариантные показатели позволяют оценивать состояние и трансформацию растительных покровов, напочвенного покрова, а при сопряжении с методами математического моделирования – и состояние почв [Пономарева и др., 2022]. Одним из факторов техногенной трансформации напочвенного покрова и структуры почвы, влияние которого возрастает, является промышленное освоение золоторудных месторождений. Воздействие разработки и освоения золоторудных месторождений, определяет изменение теплового состояния трансформированных территорий в течение длительного времени. Такие изменения происходят за счет деструктивных процессов в верхних органогенных горизонтах почв и изменений строения почвенного профиля, а зачастую и сменой ландшафта, следствием чего могут быть изменения теплового и водного баланса территории, условий для сукцессии растительных покровов. В условиях высокой степени начальной трансформации восстановительные сукцессионные процессы имеют намного большие временные периоды, чем, например, в случае с послепожарным восстановлением. Детализация степени нарушенности отдельных участков позволяет прогнозировать скорость и успешность восстановительных процессов. В дистанционном мониторинге состояния растительного покрова широко используются вегетационные индексы, в частности, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Однако техногенные воздействия на растительность и напочвенный покров всегда сопровождаются изменением теплового режима поверхности, вызванного изменением спектральных свойств поверхности (альбедо) и трансформацией теплоизолирующего напочвенного покрова [Соколов и др., 2021]. Таким образом, изменение теплового поля и долговременная динамика тепловых аномалий являются дополнительными важными показателями состояния и функционирования компонентов экосистем.

Мы использовали максимально возможный временной диапазон (1973–2022) спутниковых снимков среднего пространственного разрешения (15–100 м) Landsat-8/OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor), Landsat-7 ETM (Enhanced Thematic Mapper), Landsat-4/5 TM (Thematic Mapper). А также съемку Landsat-1 MSS (Multispectral Scanner System) для обнаружения более ранних стадий повреждений. Дешифрирование трансформированных участков выполнялось по визуальным критериям и спектральным признакам. В работе были отобраны хроноряды спутниковых данных и восстановлены спектральные характеристики на трансформированные участки для четырех вариантов территорий, находящихся на разных стадиях пост-техногенного состояния: Наталкинское месторождение, разработка с 1990 г.; Куранахское рудное поле, разработка с 1965 г.; Вернинское месторождение, эксплуатация с 2011 г.; Олимпиадинское месторождение, эксплуатация с 1990 г. Мы рассматривали данные для каждого объекта в общей совокупности с рядами спектральных характеристик для остальных объектов, анализируя усредненные по всем измерениям тренды тепловых аномалий на протяжении до 60 лет после техногенного воздействия. Усреднение тепловых характеристик выполнялось по данным за летний период. Данные температур калибровались и усреднялись для нарушенных

участков и анализировались относительно данных прилегающих фоновых участков ( $\Delta T/T_{\text{фон}}$ , %). Полученные значения средствами ГИС преобразованы в карты тепловых полей с выделением уровня аномалий (рис. 1).



**Рис. 1.** Тепловые аномалии на участках золоторудных месторождений, а – Куранахское, б – Вернинское, в – Наталкинское, г – Олимпиадинское. Июль, 2022

Из рассмотрения исключались техногенные водные объекты на нарушенных участках. Участки с пост-техногенными нарушениями характеризуются значительным изменением теплового режима в летний период по отношению к фону. Тепловые аномалии в среднем сохраняются на уровне 15–25% в конце лета (август) даже спустя 50 лет (Куранахское месторождение), что возможно при практически полном отсутствии восстановления растительности. Наблюдается рост тепловых аномалий за счет увеличения площади нарушения и процессов в прилегающих буферных зонах. В периоды более интенсивного прогрева (июль) такие аномальные превышения температуры могут составлять уже до 50%, а на некоторых участках – до 100% относительно фоновых характеристик. При увеличении техногенной нагрузки на территории Сибири можно ожидать дальнейшее увеличение площади участков со значительным изменением тепловых режимов по сравнению с фоном. С учетом длительности процесса стабилизации тепловых свойств поверхности, а также значительного остаточного уровня тепловой аномалии можно предполагать увеличение биосферной роли неотехногенных экосистем. Наиболее значимые процессы, связанные с этим эффектом, могут наблюдаться в зоне мерзлоты, где дополнительный прогрев влияет на динамику сезонно-талого слоя почвы [Пономарева и др., 2022].

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 23-14-20007.

*Пономарева Т.В., Пономарев Е.И., Литвинцев К.Ю., Финников К.А., Якимов Н.Д.* Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 3. С. 16-35.

*Соколов Д.А., Андроханов В.А., Абакумов Е.В.* Почвообразование в техногенных ландшафтах: тренды, результаты и отражение в современных классификациях (обзор) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021. № 56. С. 6-32.

## Спектральный анализ почвенно-растительного покрова дренированных озерных котловин Большеземельской тундры

Якубенко С.В.<sup>1</sup>, Каверин Д.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,  
Сыктывкар, Россия

<sup>2</sup>Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия  
e-mail: staslp750@gmail.com

На участке искусственного осушения термокарстовых озер в Большеземельской тундре [Какунов, 1980] (урочище Пятембой Гладь) проведен спектральный анализ изменений поверхности почвенно-растительного покрова дренированных озерных котловин Большеземельской тундры. Участок исследований находится в зоне преимущественно сплошного распространения многолетнемерзлых пород с температурой  $-2...0^{\circ}\text{C}$ . Трансформация почвенно-растительного покрова осушенных котловин напрямую влияет на мерзлотную обстановку в их контурах [Kaverin et al., 2017]. Основой для исследований выбрали космические снимки Sentinel-2 и Landsat 4-5, 7 в мультиспектральном диапазоне (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Дальнейшую обработку космоснимков проводили в программном обеспечении QGIS версии 3.22. При сравнении космоснимков выявлено, что наибольший контраст как внутри дренированных котловин, так и между ними и окружающими ландшафтными разностями проявляется в осенний период при использовании комбинации каналов: красный (B04), ближний инфракрасный (B08) и коротковолновый (B12). Для выделения современных озер создали маску водных пространств с использованием ближнего инфракрасного канала B06 (Sentinel-2). Созданный слой наложили на топографическую карту 1963 года, отображающей большее, чем в настоящее время, количество озерных котловин с водной поверхностью. В результате определено 40 дренированных котловин, ранее являющихся озерами и, очевидно, осушенные в 1979 г. [Какунов, 1980].

Для понимания временной динамики изменений почвенно-растительного покрова котловин использована серия из 34 безоблачных снимков с 1985 по 2022 гг. Для котловин и окружающей территории рассчитаны значения индексов NDVI методом зональной статистики растровых изображений. Анализ изменений площадей растительных сообществ, ассоциированных с многолетнемерзлыми породами (открытые торфяные поверхности) и без таковых (ивняки), внутри контуров осушенных котловин проведен методом максимального подбора при классификации изображений снимков 1985, 1997, 2009 и 2022 гг. в натуральных цветах. Классификацию снимков проводили в несколько этапов: 1. Создание сигнатур искомым классам почвенно-растительного покрова; 2. Классификация растра с помощью инструмента i.smap на основании значений синего, зеленого и красного каналов (2, 3, 4 у Landsat и 3, 4, 5 у Sentinel); 3. Векторизация растра (инструмент r.to.vect) с расчетом площади полигонов.

Среди осушенных в 1979 г. озерных котловин выделено 3 основные группы: 1. с преобладанием тундровых луговин; 2. с преобладанием ивняковой растительности; 3. сильнозаболоченные котловины. Кроме того, методические подходы в примененном ГИС анализе позволили выделить котловины, дренированные естественным путем ранее 1963 года. Данный аспект является перспективным для проведения дальнейших исследований. На участке исследований осредненные значения индекса NDVI увеличились с 0,6 до 0,7 ( $R^2=0,51$ ). В дренированных озерных котловинах осредненные значения индекса достигли 0,8 при максимальном значении тренда ( $R^2=0,68$ ). При этом, в котловинах с преобладанием луговой растительности значения тренда составили  $R^2=0,60$ , ивняковой – 0,65. Для сравнения, в старых (дренированных до 1963 г.) котловинах с преобладанием ивняковой растительности рост индекса NDVI составил лишь 0,49. В период 1985-2022 гг. в пределах дренированных осушенных котловин выявлено снижение площади оголенного

торфа с 61 до 5 Га с нисходящим трендом  $R^2=0,9$ . На этом фоне произошло резкое увеличение площади крупнокустарниковых сообществ с 2 до 56 Га ( $R^2=1,0$ ). Наибольшие изменения в структуре почвенно-растительного покрова произошли в период с 1985 по 1997 гг., когда площадь ивняковых участков увеличилась в 17 раз, а площадь открытых торфяных участков уменьшилась в 4 раза. Такая динамика согласуется с особенностями активных изменений мерзлотной обстановки в пределах осушенных котловин на рубеже 1980-90-х гг. [Kaverin et al., 2017]. Уменьшение площади многолетнемерзлых пород, а соответственно и мерзлотных почв, в котловинах в большей степени связано с их значительным закустариванием, темпы которого максимально выражены через 10-15 лет после осушения озер.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование выполнено при поддержке темы НИР Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600023-8 «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв бореальных и арктических экосистем европейского Северо-Востока в условиях антропогенных воздействий, глобальных и современных региональных климатических трендов».

*Какунов Н.Б.* Климатические изменения и динамика водно-тепловых условий почвогрунтов и растительности в естественном и нарушенном состоянии / Н. Б. Какунов // Геология разведки, 1980, № 7, С. 134–138.

*Kaverin D.A., Melnichuk E.B., Shiklomanov N.I., Kakunov N.B., Pastukhov A.V., Shiklomanov A.N.* Long-term changes in the ground thermal regime of an artificially drained thaw-lake basin in the Russian European north // Permafrost and Periglacial Processes, 2017, Vol. 29, P. 49–59, DOI: 10.1002/ppp.1963.

United States Geological Survey (Электронный ресурс). – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

## СЕКЦИЯ 6. ЭКОСИСТЕМНЫЕ УСЛУГИ, ПРОБЛЕМЫ ОХРАНЫ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ

---

### Пирогенные трансформации свойств и состава мерзлотных тундровых почв Северной Якутии

*Алексеев А.А., Чевычелов А.П., Кузнецова Л.И., Бурнашева М.П.  
Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия  
e-mail: alex3.fromru@gmail.com*

Наши исследования проводились в Северной Якутии, на территории Яно-Индигирской низменности в 2022 г. В 2020 г. в районе исследований в условиях маловодного года и засушливого лета произошел сильный тундровый пожар. Учитывая то, что данный пожар распространился по поверхности едомы, характеризующейся плоскобугристо-мочажинным рельефом, этот пожар прошел в основном по мерзлотным буграм и в меньшей степени затронул напочвенный растительный покров сырых мочажин. Яно-Индигирская низменность – это наиболее пониженная и выровненная часть территории, наследующая палеоген-неогеновую структуру устойчивого погружения. Северная часть низменности занимает озерно-болотная аласная равнина, которая образовалась из едомной равнины в результате развития термокарстовых процессов. Высота равнины достигает 10-25 м, с отдельными останцами едомы высотой до 40-60 м. Едомная свита является сложнопостроенным геологическим телом, включающим в себя лессовидные криогенные, аллювиальные и озерно-аллювиальные отложения [Иваненко, 2000]. Согласно почвенно-географическому районированию Северной Якутии, исследуемый район относится к Яно-Индигирской провинции мерзлотных тундровых почв, где преобладают мерзлотные перегнойно- и перегнойно- торфянисто-глеевые почвы (65%) в сочетании с мерзлотными болотными (20%) и мерзлотными тундровыми глееватыми почвами [Еловская и др., 1979].

В течение 2 лет после сильного тундрового пожара морфологический профиль мерзлотной тундровой глееватой почвы, имевший вид: O(0-4)–A0A1(4-9)–BCg(9-19 см), трансформировался в таковой мерзлотной тундровой перегнойно-глеевой, характеризующийся следующим строением: Apig(0-6/9)–BCg(6/9-38)–G(38-54 см) (рис. 1). При этом органогенные горизонты O и A0A1 первичной почвы полностью выгорели и минерализовались и на их месте сформировался гор. Apig с включением черных древесных углей. При этом мощность сезонно-талого слоя (СТС) исходной почвы увеличилась с 19 до 54 см, то есть в 2,8 раза. В протаявшей толще минеральных горизонтов температура возросла с 1,1-2,3°C до 2,3-6,1 °C, глубина проникновения положительных t в почву увеличилась с 15 до 40 см, а полевая влажность гор. BCg также возросла с 56 до 66%, то есть увеличилась в среднем на 10%.



**Рис. 1.** Морфологическое строение профиля мерзлотной тундровой перегнойно-глеевой пирогенно-трансформированной почвы, разрез 3Ч-22.

Горизонт	Глубина, см	рН		Гумус (ППП), %	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г почвы			Сумма частиц, %	
		H <sub>2</sub> O	KCl		Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	H <sup>+</sup>	<0,001 мм	<0,01 мм
Тундровая перегнойно-глееватая, разрез 2Ч-22									
O	0-4	3,3	2,2	97,3*	22,5	22,4	69,1	–	–
A0A1	4-9	3,3	2,3	72,7*	22,4	22,2	64,8	–	–
BCg	9-19	4,0	3,1	27,0*	3,7	11,0	24,0	11,2	21,8
Тундровая перегнойно-глеевая пирогенно-трансформированная, разрез 3Ч-22									
Apir	0-6/9	4,2	3,2	33,8*	9,4	9,2	20,9	–	–
BCg	10-20	4,4	2,8	3,9	8,2	6,8	5,4	14,1	37,3
BCg	28-38	4,9	3,0	3,2	7,2	7,2	2,7	13,8	35,6
G	40-50	7,7	6,8	4,2	20,2	7,2	0,1	11,4	30,3

**Табл. 1.** Физико-химические свойства мерзлотных тундровых почв Северной Якутии  
**Примечание.** \*приведено значение потери при прокаливании, прочерк – значение не определено.

Значительно изменились также физико-химические (табл. 1) и магнитные свойства исследуемых тундровых почв. Реакция среды в контрольной почве разреза 2Ч-22 характеризовалась по всему профилю как сильноокислая, а в пирогенно-трансформированной почве разреза 3Ч-22 – уже в гор. Apir и BCg как кислая, а в надмерзлотном гор. G – даже как слабощелочная, при этом рН<sub>H<sub>2</sub>O</sub> соответственно увеличился на 0,9-1,1 и 3,7 единицы. Также существенно изменяется в постпирогенный период здесь как общее, так и относительное содержание обменных оснований в почвенно-поглощающем комплексе данных почв. Так, средневзвешенное количество суммы катионов Ca<sup>+2</sup>+Mg<sup>+2</sup> уменьшилось с 28,9 до 19,0 ммоль(экв)/100 г почвы или в 1,5 раза, а таковое обменного Н<sup>+</sup> с 55,1 до

5,1 ммоль(экв)/100 г почвы или более чем в 10 раз. Гранулометрический состав исследуемых почв также изменился от легко- до среднесуглинистого. Помимо данных показателей здесь фиксируется значительное изменение магнитной восприимчивости изучаемых почв, при этом средневзвешенное значение удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  в пирогенно-трансформированной почве разреза 3Ч-22 возросло в 1,5 раза по сравнению с исходной почвой разреза 2Ч-22, то есть увеличилось с 3,7 до  $5,6 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг. Все эти отмеченные изменения являются следствием выгорания и минерализации почвенного органического вещества, а также изменения окислительно-восстановительного потенциала и влажности данных почв в процессе деградации многолетней мерзлоты и увеличения мощности СТС.

*Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В.* Почвы Северной Якутии. – Новосибирск: Изд-во «Наука» Сибирское Отделение, 1979. – 304 с.

*Иваненко М.В.* Государственная геологическая карта масштаба 1:1000 000. Лист R (55) 57 Q. – СПб.: Изд-во картографической фабрики ВСЕГЕИ, 2000. – 1 л.

## Восстановление нефтезагрязненных почв на севере Западной Сибири с помощью сорбционной биоремедиации

*Васильева Г.К.<sup>1</sup>, Михедова Е.Е.<sup>1</sup>, Стрижакова Е.Р.<sup>1</sup>, Филонов А.Е.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия

<sup>2</sup>Институт Биохимии и физиологии микроорганизмов РАН, Пушкино, Россия

*e-mail: gkvasilyeva@rambler.ru*

На сегодняшний день Российская Федерация является одной из богатейших стран мира по запасам нефти и газа. Однако, при добыче и транспортировке нефти и нефтепродуктов в России ежегодно происходит более 13 тыс. нефтеразливов. Особенно чувствительны к нефтяному загрязнению экосистемы на севере Западной Сибири, в частности территории ЯНАО и ХМАО, где добывается более 60% всей Российской нефти. Другим источником нефтяного загрязнения почв Арктического региона могут быть аварийные ситуации при разливе жидкого топлива в местах его хранения, ярким примером которой стал аварийный разлив 21 тыс. тонн дизельного топлива под Норильском в мае 2020 г. Поэтому разработка эффективных методов очистки нефтезагрязненных почв Северных территорий Западной Сибири особенно актуальна.

Ранее нами была разработана методика сорбционной биоремедиации нефтезагрязненных почв центрального региона России: серой лесной, черноземной и аллювиально-луговой [Vasilyeva et al., 2020; 2022]. Целью данных исследований было адаптировать разработанную технологию для очистки от нефти и нефтепродуктов минеральных почв нефтегазоносных территорий на севере Западной Сибири.

На первом этапе в условиях вегетационного эксперимента было установлено, что внесение оптимальных доз ряда натуральных (несинтетических) сорбентов может существенно ускорять темпы биоремедиации песчаной глеево-подзолистой почвы, отобранной вблизи Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (ЯНАО). Были выявлены наиболее перспективные сорбенты, способствующие ускорению процесса.

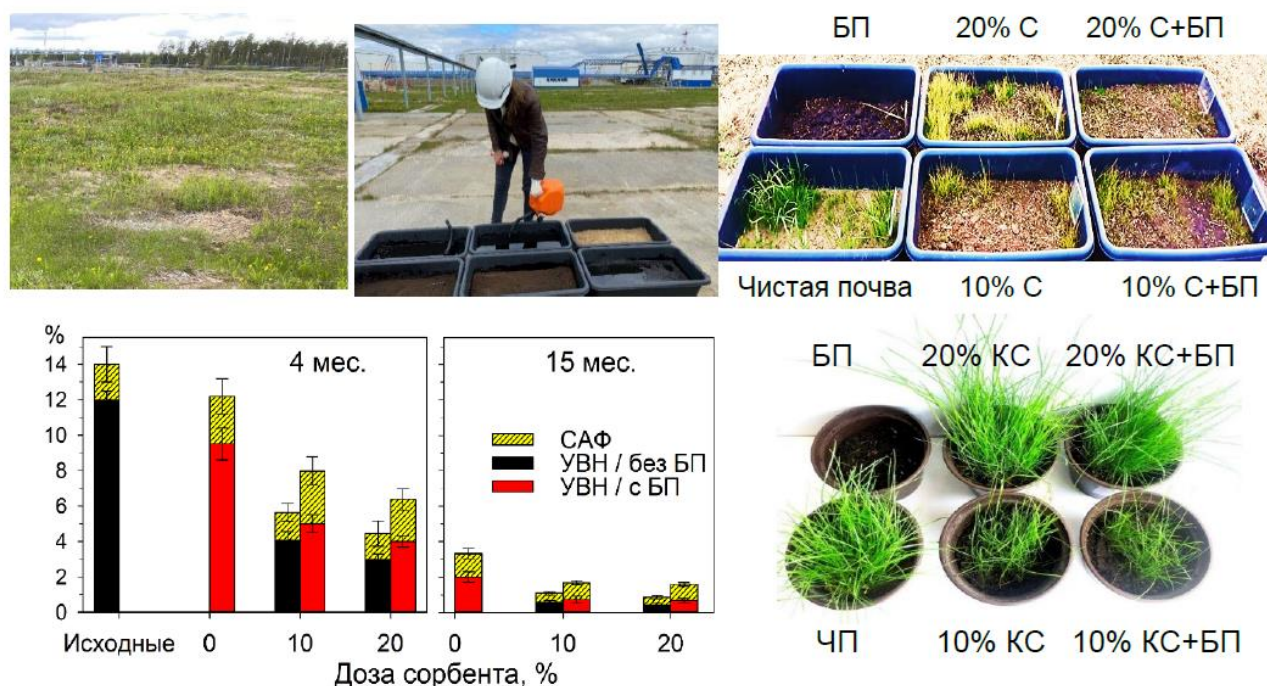
На следующем этапе в условиях микрополевого и вегетационных экспериментов было изучено влияние ряда сорбентов на скорость биоремедиации нефтезагрязненной дерново-глеевой почвы, отобранной вблизи Смотлорского нефтяного месторождения. В почву вносили минеральные удобрения из расчета С:N:P:K=50:1:0,4:0,8, доломитовую муку для нейтрализации избыточной кислотности и биопрепарат «Микробак» на основе мезотрофных микроорганизмов, разработанный в ИБФМ РАН. В результате исследований был разработан композитный сорбент «КС» (на основе гранулированного активированного угля и торфа), внесение которого резко ускоряло процесс биоремедиации, особенно при высоком уровне загрязнения – 12% нефти. Биотестирование с помощью фитотестов, основанных на измерении длины проростков ячменя, а также острого и хронического биотеста на *Daphnia magna*, показало, что до конца 3-го сезона сильнозагрязненная почва, обработанная одним биопрепаратом, проявляла высокую токсичность. В то же время в вариантах с добавками КС к концу 2-го сезона суммарная концентрация углеводов (УВН) снизилась до ориентировочно допустимого уровня (0,5%) на фоне меньшего накопления смолисто-асфальтеновой фракции (САФ), а фито- и биотоксичность – до минимума.

Механизм положительного действия сорбентов объясняется снижением токсичности почвы за счет преимущественно обратимой сорбции углеводов и их метаболитов. Кроме того, в присутствии сорбента в результате снижения гидрофобности почвы повышается ее влагоемкость, а, следовательно, поддерживается оптимальная полевая влажность почвы в течение всего периода обработки. Это обеспечивает условия для активации микроорганизмов-деструкторов, как инокулированных в виде биопрепарата, так и аборигенных, что подтверждается более высоким уровнем дегидрогеназной активности почвы и численности углеводородокисляющих микроорганизмов по сравнению с контролем,



обработанным одним биопрепаратом.

Высокая эффективность разработанного метода была подтверждена в условиях полевого эксперимента, заложенного на территории производственного объекта компании «Транснефть» вблизи г. Сургут. В почвы из разных контейнеров вносили сорбент КС в дозе 10 или 20%, а также биопрепарат «Микробак» (БП, из расчета  $10^7$  кл./г), разработанный в лаборатории биологии плазмид ИБФМ РАН. Сорбент и БП вносили вместе и отдельно. Помимо этого, в почву вносили минеральные удобрения в виде Азофоски и доломитовую муку. Через 2 мес. почва была засеяна травосмесью. На рис. 1 показана закладка эксперимента на экспериментальной площадке 5 июня 2021 г. и некоторые его результаты в конце 1-го и 2-го сезонов.



**Рис. 1.** Закладка эксперимента по сорбционной биоремедиации литострата песчаного, загрязненного 15% нефти, вблизи г. Сургут, влияние БП, отдельно и в комплексе с 10 и 20% КС на остаточную концентрацию УВН и САФ через 4 и 15 мес. обработки, а также вид экспериментальных сосудов в конце первого сезона и фитотест через 15 мес.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ:

Авторы выражают благодарность сотрудникам компании «Транснефть» за помощь в проведении эксперимента на ЛПДС Западный Сургут.

Vasilyeva G.K, Kondrashina V.S., Strijakova E.R., Ortega-Calvo J.J. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil // *Science of the Total Environment*, 2020, Vol. 706, №135739. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135739.

Vasilyeva G.K, Mikhedova E.E., Zinnatshina L.V., Strijakova E.R., Akhmetov L.I., Sushkova S.N., Ortega-Calvo J.J. Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil // *Science of the Total Environment*, 2022, Vol. 850, №157952. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157952.

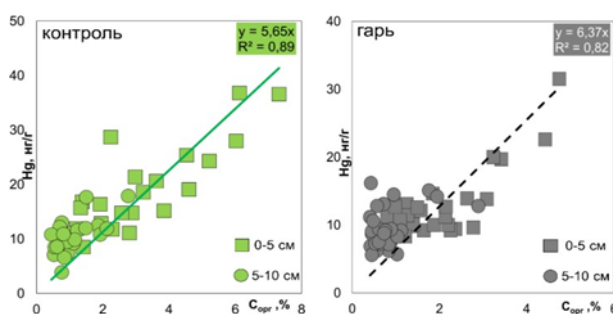
## Влияние природных пожаров в лесотундре на содержание ртути в почвах

*Ватутин Г.Д., Филимоненко Е.А., Юртаев А.А., Клюка Г.Г., Приходько Н.В.  
Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия  
e-mail: georgyvautin@yandex.ru*

Ртуть (Hg) – высокотоксичный тяжелый металл, способный накапливаться в живых организмах и мигрировать по трофическим цепям. В высокоширотные экосистемы атмосферная газообразная ртуть Hg(0) переносится потоками воздуха с территорий умеренных широт и является основным источником накопления Hg в растениях и почвах, особенно в органических горизонтах [Eyrikh et.al., 2022]. Пожары являются фактором вторичной эмиссии в атмосферу Hg, накопленной в верхних органических горизонтах почв. Целью исследования являлась оценка влияния природных пожаров в лесотундре на снижение содержаний органического углерода и Hg в почвах.

Для исследования были выбраны 6 участков на территории Тазовского и Надымского районов Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), где воздействие пожара на почвы происходило от нескольких месяцев до 32 лет до их изучения (пробоотбор – 2022 г.). К каждому пирогенному участку был подобран соответствующий фоновый участок, на котором не было пожаров минимум последние 50 лет. Почвы отбирались с глубин 0–5 и 5–10 см в пяти пространственных повторностях. Отобранные почвы (100 образцов) были высушены при комнатной температуре, просеяны через сито и гомогенизированы на вибрационной мельнице Retsch MM 400. Определение содержаний органического углерода ( $C_{орг}$ ) выполнялось методом сухого сжигания на элементном анализаторе Vario Puro Cube Analyzer (Elementar, Германия) в Центре изотопной биогеохимии Тюменского государственного университета (ТюмГУ). Концентрации Hg в почвах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на ртутном анализаторе «РА-915М» с пиролизической приставкой «РП-91» (Люмэкс, Россия) в лаборатории экологических исследований Центра коллективного пользования «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» Института химии ТюмГУ.

По результатам исследований установлены линейные регрессионные зависимости содержаний Hg и  $C_{орг}$  в почвах лесотундры на фоновых и постпирогенных участках (рис. 1): с увеличением в почвах содержания  $C_{орг}$  на 1%, концентрации Hg увеличиваются на 5,7 нг/г – для фоновых участков; на 6,4 нг/г – для постпирогенных.



**Рис. 1.** Регрессионные зависимости между содержаниями органического углерода ( $C_{орг}$ ) и ртути (Hg) в постпирогенных и фоновых почвах лесотундры ЯНАО

Среднее содержание Hg в почвах лесотундры ЯНАО на глубине 0–5 см составляет  $19,5 \pm 2,9$  нг/г (min – 12,5 нг/г, max – 32,7 нг/г), что превышает кларк Hg в почвах (10 нг/г, (Агбалян и Листишенко, 2017)) в 2 раза. Концентрация Hg в почвах на глубине 5–10 см имеет среднее значение, равное  $10,4 \pm 1,0$  нг/г (min – 8,3 нг/г, max – 14,3 нг/г) и соответствует кларку Hg в почве.

В постпирогенных почвах на глубине 0–5 см концентрации Hg снижены в среднем на 40% в сравнении с почвами фоновых участков. На глубине 5–10 см средняя концентрация Hg в пирогенных почвах ( $10 \pm 1,2$  нг/г) незначительно отличается от содержаний в почвах фоновых территорий. Наибольшие снижения концентраций Hg отмечены на участках, где пожар был за 2 и 4 года до пробоотбора.

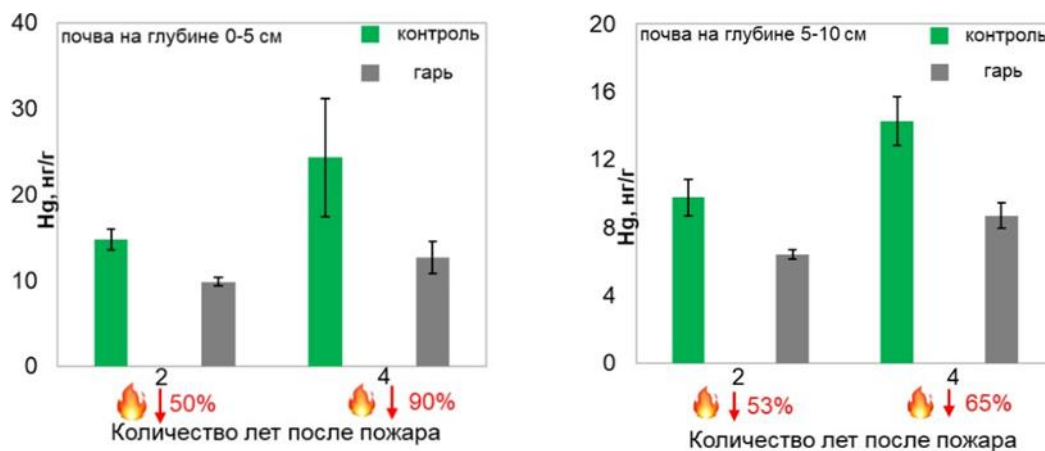


Рис. 2. Средние содержания Hg в фоновых и постпирогенных почвах лесотундры ЯНАО

Повышение частоты природных пожаров, связанное с увеличением антропогенной нагрузки на территорию лесотундры и глобальными изменениями климата [McCarty et al., 2021], сочетающееся с влиянием природных пожаров на реэмиграцию Hg из почв в атмосферу, является важным механизмом регулирования биогеохимического цикла Hg.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Тюменской области в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра № 89-ДОН и проекта CarboRus (075-15-2021-610).

*Агбалян Е.В., Листищенко А.А.* Накопление поллютантов (ртути и кадмия) в почве, растительности и организме животных. // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2017. № 3 (96). С. 4–11.

*Eyrikh S., Shol L., Shinkaruk E.* Assessment of mercury concentrations and fluxes from the atmosphere on the territory of the Yamal-Nenets Autonomous Area // Atmosphere, 2022, Vol. 13, No. 37, pp. 1-16. DOI: 10.3390/atmos13010037.

*McCarty J.L., Aalto J., Paunu V.-V., Arnold S.R., Eckhardt S., Klimont Z., Fain J.J., Evangelidou N., Venäläinen A., Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Kupiainen K., Soja A.J., Huang L. and Wilson S.* Reviews and syntheses: Arctic fire regimes and emissions in the 21st century // Biogeosciences, 2021, Vol. 18, No. 18, pp. 5053–5083. DOI: 10.5194/bg-18-5053-2021.

## Влияние загрязнений различного типа на природные и антропогенные комплексы в Российской Арктике

*Гвоздева В.О.*

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия  
e-mail: Gvozdeva.victory@yandex.ru*

Российская Арктика – северные полярные области Российской Федерации с северными островами и прилегающими частями Северного Ледовитого океана. В настоящий момент в Арктике наблюдается стремительное накопление антропогенных отходов, что сказывается на экологическом состоянии территории не меньше, чем глобальные изменения климата. Столь активное загрязнение вызвано добычей полезных ископаемых. Арктические экосистемы имеют гораздо более долгий период восстановления и очищения по сравнению с другими экосистемами за счет своей специфики, что усиливает негативный эффект антропогенного загрязнения.

Целью работы было рассмотрение трансформации природных комплексов и антропогенных систем при накоплении отходов в российской Арктике.

Работа основана на анализе научной литературы, дешифрировании спутниковых снимков, а также на применении количественных методов оценки изменения мерзлотных условий. В результате исследований было установлено:

1) Численность населения в том или ином поселении во многом определяет количество бытовых стоков и водопотребление. Чем больше численность населенного пункта, тем больше бытовых отходов и стоков; этажность застройки влияет на перераспределение снега и последующий паводок с учетом загрязнений, накопленных с снегоотвалах. Существенное значение имеют не только площадь урбанизированной среды, но и длительность существования поселения: чем старше город, тем сильнее воздействие на природную среду; чем активнее идут темпы роста населения, тем заметнее изменение природной среды.

2) Максимальное воздействие на природную среду (включая и почвенно-растительные условия) оказывают производственные объекты, прежде всего, их специфика. Например, утечки газа (газовая промышленность) влияют на экосистемы многократно меньше, чем добыча и разливы нефти; вместе с тем, и в том, и в другом случае чрезвычайно актуальна проблема складирования и хранения буровых растворов. Добыча руды, угля и других полезных ископаемых открытым или шахтным способами фактически уничтожает природные геокриологические условия; деградация (вплоть до полного исчезновения) мерзлоты происходит при существовании металлургических производств, например, в Норильском промрайоне, где также крайне опасными являются шлакоотвалы и хвостохранилища, вредные вещества, такие как легкорастворимые соли сульфатного и хлоридного состава, соли тяжёлых металлов, фенол, бензол, формальдегид и аммиачные соединения загрязняют подземные воды и накапливаются в геохимических барьерах почвы. Весьма негативную роль здесь играет и ветровой разнос пыли, при этом вредными веществами (никель, кобальт и другие тяжелые металлы) загрязнены огромные (в радиусе до 150 – 250 км) природные территории.

3) Транспортные системы влияют на Арктические экосистемы следующим образом: изменение альбедо поверхности, загрязнение прилегающих территорий сыпучими веществами, что подавляет биоту и изменяет микрорельеф. Помимо этого, наличие транспортных систем провоцирует более ранний сход снежного покрова, это усиливает опасные криогенные процессы и увеличение стока подземных вод. При прокладке трубопроводов и бурении под опоры уничтожается почвенно-растительный покров – причина развития осадок и неравномерного пучения (при промерзании) грунтов сезонно-талого слоя. Опасны аварии нефтепроводов, в частности для водных систем Арктики, происходит угнетение водной биоты и растительности, находящейся в непосредственной близости с

загрязненным водоемом.

4) Водохранилища влияют на уровень грунтовых вод, температуру грунта и мерзлоты (при затоплении территории происходит повышение температуры, что может привести к оттаиванию последней); наблюдается изменение микроклимата, выраженное в выравнивании сезонных колебаний температуры, увеличении скорости ветра, повышение влажности воздуха и увеличении количества осадков на сопредельной территории; активизируются опасные экзогенные, в т. ч. криогенные, процессы на примыкающих участках.

5) Загрязняющие вещества переносятся различными путями: водотоками, воздушными массами. Многие загрязняющие вещества, которые образуются на предприятиях, расположенных в Арктике, переносятся за ее пределы. Например, загрязняющие вещества от угольной промышленности в Воркуте, влекомые западным воздушным переносом, обнаруживались на территории соседних областей (Пермский край, ЯНАО).

6) Радиационное загрязнение Арктики происходило, в первую очередь, радионуклидами, которые были выпущены в окружающую среду глобальными источниками загрязнения, такими как испытания ядерного оружия (полигон на Новой Земле), аварии на АЭС, атомные ледоколы и подводные лодки (их строительство и ремонт), горно-химические комбинаты, захоронение жидких отходов, содержащих радиоизотопы, в Карском и Баренцевом морях (дампинг). В Российской Арктике данное загрязнение носит шельфовый характер. Большая часть загрязнений оседает в Баренцевом и Карском морях из-за вогнутой формы дна (происходит снижение скорости подводных течений). Меньше всего загрязняются Чукотское и Восточно-Сибирское море. Отдельно стоит отметить, что радиоактивные воды могут попадать в различные акватории из-за дрейфа морского льда и айсбергов [Айбулатов, 2000].

7) Отдельно было рассмотрено механическое воздействие на природную среду Арктики: устройство карьеров, добыча руды и т.д. Этот вид воздействия крайне опасен, так как происходит уничтожение литогенной основы территории, после чего восстановление экосистем не представляется возможным.

Ключевым в воздействии загрязнителей на природные условия является их многообразие. Трансформация природных условий зависит от вида воздействий прямых и косвенных. Эта трансформация разномасштабна, разносинхронна, идет с разной скоростью. Загрязнения меняют разные компоненты природы, некоторые из них необратимы, такие как карьерная добыча полезных ископаемых, а некоторые поддаются регулированию.

*Айбулатов Н.А.* Экологическое эхо холодной войны в морях российской Арктики. М.: ГЕОС, 2000 – С.6-42, 75.

## Пожарная активность ландшафтов южной криолитозоны Республики Коми в голоцене (по данным педоантракологического анализа)

*Горбач Н.М.<sup>1,2</sup>, Старцев В.В.<sup>2</sup>, Дымов А.А.<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>*Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорочкина,  
Сыктывкар, Россия*

<sup>2</sup>*Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
e-mail: nikolay.tbo@yandex.ru*

Пожары являются общепланетарным явлением и оказывают влияние на все компоненты экосистем, включая почвы. В отдельные годы пирогенная активность может существенно смещаться на север, в том числе и в криолитозону [Dymov et al. 2021]. В почвах криолитозоны сосредоточены значительные запасы углерода. Пожары могут приводить к катастрофическим последствиям, связанным с изменением водного режима и изменением мощности деятельного слоя [Desyatkin, Desyatkin, 2019, Knorre et al., 2019]. Данные по пирогенной активности ландшафтов криолитозоны являются крайне важными для оценки трансформации экосистем. К настоящему времени отсутствуют данные о пирогенной активности в течение голоцена для ландшафтов южной криолитозоны Европейской части России. В связи с чем, цель данной работы заключалась в реконструкции динамики пожаров в ландшафтах юга криолитозоны на северо-востоке Европейской территории России в голоцене (с применением педоантракологического анализа торфяных почв).

Исследования проводили на границе Республики Коми и Ненецкого автономного округа. Объект исследования представлен мерзлотным бугристым болотом и расположен на территории заказника «Сула-Харьгаинский» (66°91' с.ш.; 51°93' в.д.). Колонки торфа с ненарушенной структурой были отобраны в центральной части болотного массива с помощью ручного торфяного бура. Радиоуглеродный анализ проводили жидкостно-сцинтилляционным методом в Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН (ИМКЭС СО РАН). Калибровка радиоуглеродного возраста в календарный возраст произведена с помощью программы CALIB REV 8.2. На основе калиброванного возраста построена модель скорости вертикального прироста торфяной залежи при помощи программы Clam 2.3.9. Анализ макрочастиц угля (пирогенные остатки более 125 мкм) проводили с предварительным обесцвечиванием органического материала.

В результате исследований установлено, что формирование торфяника мощностью 302 см началось более 10 тыс. л. н. ( $9070 \pm 250$  <sup>14</sup>C л. н.) (рис. 1). Выявлено девять пожаров локального уровня, восемь из которых прошли в более ранние периоды голоцена (бореальный и атлантический) и один в период позднее (субатлантический). Наиболее высокая скорость аккумуляции макрочастиц угля выявлена в период с 10 до 5.2 тыс. л. н. и в большей степени относятся к бореальному и атлантическому периодам (оптимум голоцена), когда климат был существенно теплее и влажнее. Анализ макрочастиц показал резкое увеличение скорости концентрации аккумуляции постпирогенных частиц в нижних горизонтах исследуемого торфяника. Вероятно, изначально на месте болота располагалось озеро, которое было способно улавливать макрочастицы. С другой стороны, пожары могли являться фактором, приведшим к первоначальному заболачиванию территории.

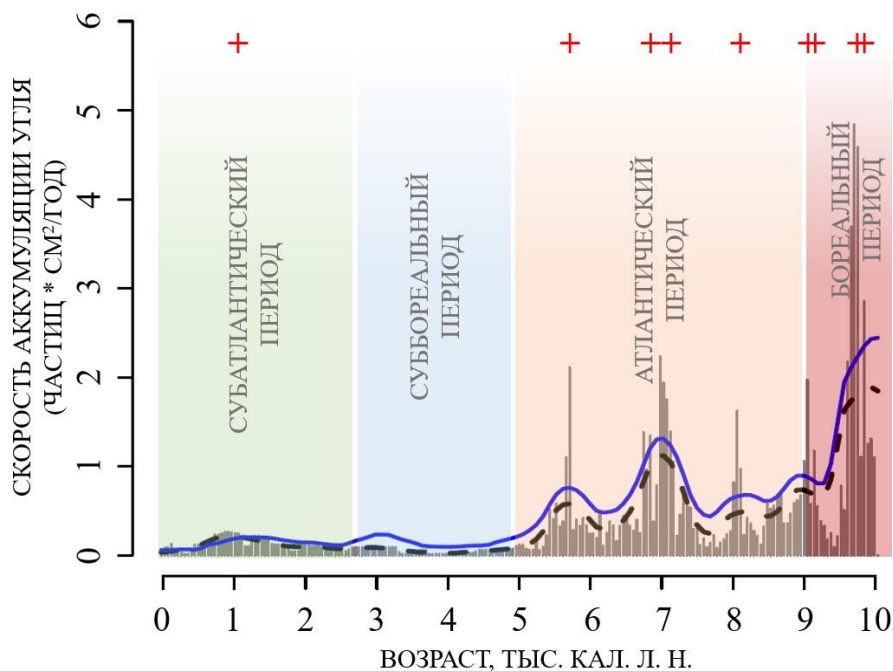


Рис. 1. Результаты анализа макрочастиц торфяных отложений.

#### Благодарность.

Работы выполнены в рамках ГБ тем «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов» (№ 122040600023-8) и «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России» (№ 122040100031-8).

*Desyatkin R.V., Desyatkin A.R.* The Effect of Increasing Active Layer Depth on Changes in the Water Budget in the Cryolithozone // Eurasian Soil Science. 2019, Vol. 52, No.11, pp. 1447–1455. <https://doi.org/10.1134/S106422931911003>.

*Dymov A.A., Startsev V.V., Milanovsky E.Yu., Valdes-Korovkin I.A., Farkhodov Yu.R., Yudina A.V., Donnerhack O., Guggenberger G.* Soils and soil organic matter transformations during the two years after a low-intensity surface fire (Subpolar Ural, Russia) // Geoderma. 2021. 404. 115278. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115278>.

*Knorre A.A., Kirdeyanov A.V., Prokushkin A.S., Krusic P.J., Büntgen U.* Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // Science of The Total Environment, V. 652, 2019, P. 314–319, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.124>.

## Тяжелые металлы в мерзлотных почвах Тункинской долины

*Елсукова Е.Ю., Кравец А.*

*Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, Санкт-Петербург  
e-mail: e.elsukova@spbu.ru*

В рамках нашего исследования были изучены почвы Тункинской долины (Республика Бурятия), которая расположена в Байкальской рифтовой зоне и входит в систему межгорных понижений гор Восточного Саяна. На территории Тункинской долины было заложено и описано 14 почвенных разрезов, среди которых определены мерзлотные почвы.

Исследования проводились в 2021 и 2022 гг. Из каждого горизонта почвенного разреза отобраны пробы почвы, в которых определены механический состав, содержание углерода по методу Тюрина, кислотность, подвижные формы тяжелых металлов атомно-эмиссионным методом (Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr, V, Zn). Проведена статистическая обработка полученных данных.

Тункинская долина состоит из поверхностей разных типов предгорных наклонных равнин, обширных озерно-болотных низин с крайне затрудненным дренажем, представляющих собой зоны активного современного осадконакопления, аллювиальной террасированной равнины р. Иркут. Почвообразующие породы представлены четвертичными отложениями. В ходе проведенных исследований было установлено, что почвы Тункинской долины разнообразны и имеют мозаичное распределение. По почвенному районированию Байкальской Сибири Тункинская котловина входит в Тункинский округ горных почв и почв межгорных котловин южной тайги Среднесибирской лесолуговой провинции с *серыми лесными, луговыми и аллювиально-луговыми* почвами на суглинках, супесях и песках озерного и ледникового происхождения. Основными почвами высокогорья являются *петроземы и литоземы*. Встречаются также *криометаморфические* почвы. В относительно пониженных элементах рельефа формируются *торфяно-криоземы*, содержащие многолетнемерзлые горизонты. В этих почвах наблюдаются процессы криотурбации и оглеения. Разрезы с такими почвами были заложены на террасе реки Тунка, где ее русло представляет собой сеть озер (Койморские озера). В Тункинской долине на почвенный покров оказывает влияние наличие минеральных источников. В процессе передвижения в толще породы и почв эти воды обогащаются газами, радиоактивными веществами и минеральными солями [Черкашина А.А., 2016].

По гранулометрическому составу изученные почвы относятся к супесям, легким и средним суглинкам. Содержание углерода меняется в пределах от 3 до 10%. Изученные почвы характеризуются нейтральной, слабо щелочной, реже средне щелочной реакцией среды. По результатам исследования 2021 г. показатель рН менялся от 7,75-9,20, по результатам 2022 года – от 6,22 до 8,00. Кислотно-щелочные условия сказываются на миграционных способностях химических элементов. Реакция среды преобладающего числа изученных почв, близкая к нейтральной в верхней части профиля и слабо щелочная и средне щелочная – в нижней, что свидетельствует о содержании карбонатов в почвообразующих породах региона. Кроме того, высокие значения рН можно объяснить наличием подземных минеральных источников. Именно нижние горизонты в основном имеют щелочные значение рН. Еще одно объяснение для *торфяно-криоземов* – это наличие криогенного горизонта. Мерзлота долго сохраняется в профиле и служит водупором, что приводит к насыщению почв основаниями.

По результатам исследования 2021 г. концентрации подвижных форм тяжелых металлов находятся в следующих диапазонах: Ba 12,59-102,9; Cr 0,02-0,72; Cu 0,02-4,74; Fe 7,1-158,9; Mn 3,60-357,5; Ni 0,02-0,79; Zn 0,26-3,69 мг/кг. Концентрации Cd, Pb и V в пробах ниже порога определения.



По результатам исследования 2022 г. концентрации подвижных форм тяжелых металлов представлены в таблице 1. Концентрации подвижных форм тяжелых металлов находятся в следующих диапазонах: Ba 17,54-168,4; Cd 0,06-0,53; Cr 0,11- 2,09; Cu 1,95-12,20; Fe 11,99-1124,0; Mn 12,60-296,00; Ni 0,29-2,86; Pb 0,27-2,33; Sr 3,96–102,8; V 0.04-0,84; Zn 0,58-24,20 мг/кг.

	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sr	V	Zn
Среднее	67,37	0,30	0,61	3,75	167	103,9	0,99	0,77	30,91	0,15	5,19
Min	17,54	0,06	0,11	1,95	12	12,6	0,29	0,27	3,96	0,04	0,58
Max	168,4	0,53	2,09	12,20	1124	296	2,86	2,33	102,8	0,84	24,20
Медиана	57,00	0,34	0,52	3,45	99	84,4	0,88	0,65	27,51	0,12	3,32
ПДК	–	–	6	3	–	100	4	6	–	150	23

Табл. 1. Содержание химических элементов в почвах мг/кг.

Таким образом, содержания подвижных форм изменчивы и зависят от многих факторов, в числе которых количество атмосферных осадков, кислотность осадков и почв и т.д. Содержание подвижных форм микроэлементов, полученные в 2022 году превышают таковые, определенные в 2021. Превышения нормативов ПДК (ОДК) [Гигиенические нормативы..., 2021] наблюдаются по Cu, Mn, Zn.

В криогенных почвах химические элементы концентрируются в средних горизонтах, расположенных над криогенными горизонтами. Концентрации Fe и Mn достигают своих максимумов в верхних горизонтах почвенных разрезов. В *торфяно-криоземах и криоземах грубогумусированных* наблюдается резкое снижение содержания Fe с глубиной. Наибольшее содержание Mn, Ni и Fe наблюдается вблизи озера Ергангинское в *криоземах перегнойных*. В целом, наличие многолетней мерзлоты препятствует миграции. Повышенное содержание химических элементов чаще обнаруживается в почвах тяжелого гранулометрического состава.

Таким образом, изучен химический состав почв Тункинской долины, получены данные о содержании подвижных форм Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr, V, Zn в почвах.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Сотрудникам Ресурсного центра «Методы анализа состава вещества» Научного парка СПбГУ.

Белозерцева И. А., Черкашина А. А. Почвы и их использование в Тункинской котловине // Вестн. Тамбов. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. — 2013. — Т. 18, вып. 3. — С. 945– 949.

Черкашина А.А. Голубцов В.А. Структура почвенного покрова Тункинской котловины // География и природные ресурсы. – Иркутск, 2016. – С. 130-140.

## Оценка возможности восстановления разрушенных процессом термокарста земель в условиях Центральной Якутии

*Жирков А.Ф., Сивцев М.А.*

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия,  
e-mail: zhirkov\_af@mail.ru*

Наблюдаемое повышение температуры воздуха в арктических и субарктических регионах значительно выше, чем в среднем в мире, что влечет за собой быструю трансформацию природной среды, в том числе многолетнемерзлых пород (ММП) [IPCC, 2019]. Эта проблема крайне актуальна для территорий, где распространены сильнольдистые отложения, и в особенности, где развит ледовый комплекс, который наиболее уязвим к процессам термокарста. Эти процессы очень сильно меняют естественные и техногенные ландшафты, и затрудняют деятельности человека.

Наиболее активно процессы термокарста протекают в открытых природных и антропогенных ландшафтах [Fedorov et al., 2017]. Такие ландшафты характеризуются тонким (0-0,2 м) защитным слоем (защитный слой – это зона между основанием сезонно-талого слоя и кровлей подземных льдов). А на участках, покрытых бореальным лесом, его толщина достигает 0,7-1 м [Ефимов, Граве, 1940]. В результате современного потепления климата происходит процесс разрушения защитного слоя, который выступает буферной зоной многолетнемерзлых пород от более глубокого протаивания, что приводит к быстрому развитию термокарстовых процессов [Shur et al., 2005]. Такое положение указывает на необходимость проведения исследований для оценки возможности воссоздания защитного (переходного) слоя для восстановления нарушенных территорий с сильнольдистыми отложениями.

Предлагается комплекс мер для восстановления нарушенных термокарстовыми процессами территорий ледового комплекса путем воссоздания защитного слоя [Zhirkov et al., 2023]:

I этап. В конце летнего периода предлагается механически разровнять просевшую дневную поверхность (проведение планировки) бульдозером и спецтехникой. В конце сконструированная экспериментальная площадка огораживается.

II этап. Поздней осенью этого же года, перед началом заморозков планируется проведение оросительных работ для увлажнения ранее разровненной территории до оптимальных значений (в зависимости от количества летних осадков), при которых вся влага в деятельном слое промерзнет.

III этап. Зимой (ноябрь-март) планируется проведение снегоочистительных или снегоуплотнительных работ, для получения более глубокого промерзания увлажненных грунтов. Выбор того или иного мероприятия будет зависеть от количества снега в этот период. Выполнение всех необходимых мероприятий при оптимальных расчётных значениях увлажнения должно привести к образованию льдонасыщенного (защитного) слоя.

IV этап. Весной следующего года, для дальнейшего сохранения восстановленного защитного слоя требуются незамедлительные рекультивационные мероприятия, в случае сельскохозяйственных территорий возобновление посевных работ. В естественных ландшафтах – высадка деревьев для создания лесного массива.

В результате исследований доказана возможность восстановления разрушенных термокарстом земель с помощью комбинированного способа тепловой защиты, включающего создание теплоизоляционного (восстановление растительного покрова) и теплоемкого (увеличение льдистости грунта) слоев, обеспечивающих оптимальный уровень теплообмена в системе «атмосфера-грунт» в течение годового цикла, для достижения минимальной глубины деятельного слоя грунта. Применение нового способа позволит не только обеспечить скорую рекультивацию нарушенных термокарстом земель, но и сократить объем выбросов углерода за счет снижения степени деградации верхних слоев мерзлых пород. На основании

теоретического и натурального экспериментов установлены основные закономерности формирования деятельного слоя грунта при использовании различных вариантов тепловой защиты, подтверждающие эффективность и целесообразность использования предлагаемого способа для широкого внедрения на территориях распространения ледового комплекса.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при финансовой поддержке НИОКТР 122011800062-5 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» и гранта РФФИ № 21-55-15013 НЦНИ\_а.

*Ефимов А.И., Граве Н.А.* Погребенные льды района озера Абалах // Социалистическое строительство, 1940, № 10–11, p. 65-78.

*Fedorov, A.N.; Iwahana, G.; Konstantinov, P.Y.; Machimura, T.; Argunov, R.N.; Efremov, P.V.; Lopez, L.M.C.; Takakai, F.* Variability of permafrost and landscape conditions following clear cutting of larch forest in Central Yakutia // *Permafr. Periglac. Process.* 2017, 28, pp. 331–338.

*Shukla, P.; Skea, J.; Slade, R.; van Diemen, R.; Haughey, E.; Malley, J.; Pathak, M.; Pereira, J.P.* Technical Summary. In *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems* // Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2019, in press.

*Shur, Y.; Hinkel, K.M.; Nelson, F.E.* The transient layer: Implications for geocryology and climate-change science // *Permafr. Periglac. Process.*, 2005, vol. 16, pp. 5–17.

*Zhirkov, A.; Sivtsev, M.; Lytkin, V.; Kirillin, A.; Séjourné, A.; Wen, Z.* An Assessment of the Possibility of Restoration and Protection of Territories Disturbed by Thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia // *Land*, 2023, vol. 12, No 197. <https://doi.org/10.3390/land12010197>.

## Пространственная изменчивость запасов подстилок в лесах Амурской области и Якутии

*Иванов А.В., Брянин С.В.*

*Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия  
e-mail: aleksandr86@mail.ru*

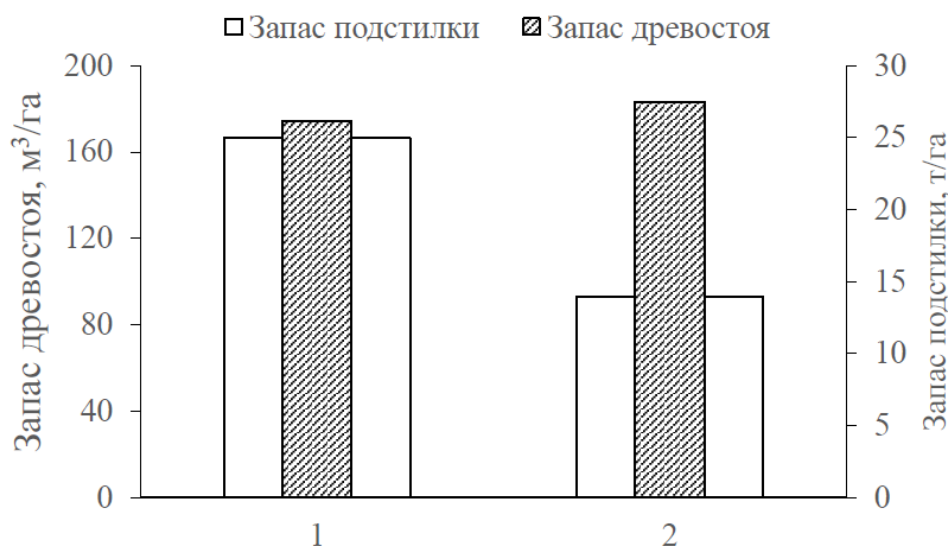
Леса Сибири и Дальнего, образованные преимущественно лиственницей, произрастают в условиях криогенных почв. Увеличение частоты и силы лесных пожаров здесь является глобальной проблемой, поскольку влечет за собой такие негативные последствия как уменьшение биомассы лесов, их среднего возраста, дополнительные пожарные эмиссии оксида углерода и метана, таяние многолетней мерзлоты. Часто лесные пожары полностью не уничтожают древостой, но изменяют свойства лесных подстилок. Лесная подстилка, состоящая преимущественно из опавших листьев, ветвей, коры, плодов, семян, коконов насекомых, выступает посредником в обмене веществом между растительностью и почвой. Подстилка является одним из пулов углерода в лесных экосистемах, на долю которой может приходиться 10% и более общих запасов углерода. Подстилки, ввиду относительно быстрых скоростей деструкции растительного опада, являются наиболее динамичной емкостью лесного углерода. Пожары могут существенно уменьшать запасы подстилок, создавая прямые эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу, что вносит существенный вклад в глобальные изменения климата.

Цель настоящего исследования – оценить вариацию запасов лесных подстилок в лесных насаждениях Амурской области и Якутии с разной степенью пожарного воздействия.

Данные для анализа получены в ходе экспедиции в июле 2019 г. на трансекте Благовещенск-Невер-Якутск протяженностью 1500 км. В ходе экспедиции было заложено 23 пробные площади (ПП) размером 50×50 м. На каждой пробной площади выполняли таксацию древостоя, геоботаническое описание и собирали подстилку с помощью рамки 25×25 см в пяти повторностях. Далее в камеральных условиях подстилку высушивали до абсолютно сухого состояния и пересчитывали запас в тонны на 1 га. Подробная информация о характеристике древостоев лесов на пробных площадях была опубликована ранее [Ivanov et al., 2022, Иванов и др., 2022].

Средний запас подстилок на 23 ПП составил 27.5±2.2 т/га. По площадкам запасы изменялись в интервале 3-45 т/га, а вариация между парцеллами (конкретными повторностями) составила 1-74 т/га. Известно, что в среднем леса северных широт характеризуются большими запасами подстилок по сравнению с более южными. Наши данные не подтверждают эти закономерности, что вероятно связано с разнонаправленными влияниями различных факторов. Например, в лиственничниках в южной части трансекты выше скорость разложения подстилок, выше величина годового опада, а действие пожаров на леса не такое разрушительное, как в северной части региона исследования.

Средние запасы древостоев в Якутии существенно ниже (на 44%), чем в Амурской области, что показывает естественное уменьшение продуктивности лесов с юга на север. При этом запасы подстилок почти не отличаются (разница 5%) (рис. 1). Таким образом, уменьшение продуктивности лесов, и как следствие уменьшение годового опада в Якутских лесах происходит на фоне уменьшения скорости разложения подстилок. Климат Якутии более засушливый. Для сравнения: в Благовещенске выпадает 600 мм осадков в год, в то время как в Якутске – 200 мм.



**Рис. 1.** Средние запасы древостоев и подстилок в лесах Амурской области (1) и Якутии (2)

Полученные данные не дают возможности оценить непосредственное воздействие пожаров на запасы подстилок (это будет сделано на следующем этапе работы с использованием данных ДЗЗ). Однако некоторые пары пробных площадей показывают, как может изменяться запас подстилки после пожара. Пробные площади 24 и 25 расположенные на Алданском Нагорье (южная Якутия) имеют запасы подстилок соответственно 42.5 и 32.6 т/га. При этом на второй площадке видны явные признаки пожара (характерный состав флоры, высокая доля сухостоя, отсутствие тонкомерных деревьев). Здесь запас подстилки уменьшился на 23.6% или на 10 т/га. Более сильное влияние пожара наблюдалось на площадках 30 и 31 в 100 км к югу от Якутска на Приленском плато. Здесь на контрольной ПП запас подстилки был 18.3 т/га, а на гари 7.1 т/га. Разница, обусловленная пожаром, составила 61.4% или 11.3 т/га. Если долю углерода в подстилках принять равной 40%, то углеродные потери в двух приведенных примерах составили 4.1 и 4.5 т С/га, соответственно. Полученные значения могут быть использованы для определения или корректировки модельных значений пожарных эмиссий в лиственничниках Сибири.

#### **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).

*Ivanov, A.V.; Neumann, Mathias; Darman, Galina F.; Danilov, Aleksandr V.; Susloparova, E.S.; Solovyov, I.D.; Kravchenko, O.M.; Smuskina, I.N.; Bryanin, Semyon V. 2022. Vulnerability of larch forests to forest fires along a latitudinal gradient in eastern Siberia. Canadian Journal of Forest Research 52(12):1543-1552. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0161>.*

*Иванов А.В., Дарман Г.Ф., Соловьев И.Д., Смушкина И.Н., Брянин С.В. Видовое разнообразие лиственничников Амурской области и Якутии // Лесоведение. 2022. № 6. С. 703-712.*

## Потенциал самоочищения почв Арктики по результатам лабораторного эксперимента

*Ковалева Е.И., Трофимов С.Я.*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
e-mail: katekov@mail.ru, strofimov@inbox.ru*

Проблема загрязнения почв дизельным топливом остается актуальной для всех арктических регионов ввиду большого объема его повсеместного хранения. Хранилища топлива часто расположены в водоохранной зоне, что затрудняет использование "зеленых" технологий, включая биологические препараты и минеральные удобрения. Поэтому крайне важно разработать альтернативные технологические решения для ускорения разложения нефтяных углеводородов в арктических почвах; найти подходы к снижению их токсичности и запуску процессов самоочищения почв, в том числе в границах водоохранных зон (ВОЗ). Некоторые мелиоранты могут снижать токсичность веществ в почвах. Так, торф сорбирует наиболее токсичные и подвижные соединения нефтяных углеводородов [Трофимов и др., 2000; Эркенова и др., 2006], пероксид кальция может быть хорошим окислителем органических веществ.

Измерение микробиологических параметров, таких как активность дыхания почвы, содержание углерода в микробной биомассе (Cmic) может служить эффективным индикатором воздействия загрязнения на качество почвы. Целями настоящей работы были: (1) изучение арктических почв (южная тундра, полуостров Таймыр), включая почвы ВОЗ, по химическим показателям; (2) оценка изменения активности дыхания почв на разный уровень загрязнения дизельным топливом; (3) оценка альтернативных подходов к снижению токсичности нефтепродуктов в почве, запускающих механизмы самоочищения, позволяющих почвенной системе выполнять экологические функции.

Исследуемый район расположен на стыке Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной и Евразийской полярной почвенно-биоклиматической области. Климат суровый, с продолжительной холодной зимой и коротким летом, среднегодовая температура воздуха составляет  $-8,8...-10,1^{\circ}\text{C}$ ; среднегодовое количество осадков 450- 613 мм. Изучены типичные почвы южной тундры полуострова Таймыр: Fluvisols, Histic Cryosols Reductaquic, Naplic Cryosols Reductaquic. Основными особенностями почвообразования в тундре являются суровость климата и наличие вечной мерзлоты близко к поверхности, а также обогащение горных пород тяжелыми металлами.

В лабораторных экспериментах изучали незагрязненные, а также искусственно загрязненные дизельным топливом почвы и влияние мелиорантов (торфяной сорбент и пероксид кальция) на уровень загрязнения. В эксперименте оценивали изменение концентраций нефтепродуктов и активности дыхания почвенной микробиоты при внесении мелиорантов во времени (1-30 дней). Добавляемые в почву дозы дизельного топлива составляли 3-30 г  $\text{кг}^{-1}$  почвы. Также изучена активность дыхания в почвах без добавок (контроль) с целью сравнения активности дыхания почв при различных уровнях загрязнения, с внесением мелиорантов и без них.

В исходных образцах почв определяли плотность методом Качинского; влажность – гравиметрическим методом. О содержании органического вещества судили по результатам определения потери при прокаливании образца почвы. Суммарное содержание нефтепродуктов в почвах выполнено ИК-спектрометрическим методом на анализаторе КН-2м. Состав образца дизельного топлива исследован ГХ-МС. Валовые и водорастворимые формы металлов в почве определяли с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, Agilent 7500a).

Параметры почвенного дыхания (микробное базальное дыхание (БД), субстрат индуцированное дыхание (СИД)) определяли в соответствии с параметрами физиологического метода [Anderson and Domsch, 1978]. СИД пересчитано в микробную

биомассу С Смик (мкг г<sup>-1</sup> почвы) из СИД (мкг г<sup>-1</sup> почвы час<sup>-1</sup>)  $\times 40,04 + 0,37$ . Удельную активность дыхания (микробный коэффициент)  $qCO_2$  (мкгСО<sub>2</sub>–Смг<sup>-1</sup> Смик час<sup>-1</sup>) рассчитывали, как отношение БД/Смик.

Содержание нефтепродуктов в незагрязненных почвах варьировало от 0,2 до 0,5 г кг<sup>-1</sup> почвы и объяснялось присутствием биогенных углеводородов. Основными характеристиками почвы были: рН около 6,5-8,0, высокие значения влажности и содержания органического вещества в почве (7-70%). Повышенный уровень содержания металлов в почвах был обусловлен региональной геохимической зоной.

Результаты экспериментов показали, что около 30-40% нефтепродуктов улетучивалось, а уровень испарения зависел от характеристик почвы. Добавление пероксида кальция повышало активность аборигенных микроорганизмов в два раза. Внесение торфа способствовало снижению концентрации нефтепродуктов за счет их сорбции и в результате разбавления. Кроме того, в присутствии торфа увеличивалось содержание нефтеокисляющих микроорганизмов до 5 раз по сравнению с контролем. Среди микромицетов обнаружены виды, способные использовать различные компоненты нефтепродуктов в качестве источника питания: *Penicillium aurantiogriseum*, *Penicillium spinulosum* species, *Exophiala jeanselmei*, *Phialophora fastigiata*.

Показано, что обработка почвы торфяным сорбентом и пероксидом кальция в дозах 1,0 т га<sup>-1</sup> и 0,75 т га<sup>-1</sup> соответственно усиливает биостимуляцию почв за счет окислительных процессов с максимумом в почвах, загрязненных 20 г дизельного топлива, по сравнению с загрязненными почвами, не обработанными мелиорантами. Несмотря на известные случаи низкой биологической активности арктических почв, у рассматриваемой группы почв существует существенный потенциал самоочищения. Наши выводы имеют решающее значение для разработки стратегий биоремедиации почв в особо охраняемых зонах.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды»; государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800147-0 «Почвенные информационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов»).

*Трофимов С.Я., Аммосова Я.М., Орлов Д.С., Суханова Н.И., Осипова Н.Н.* Влияние нефти на почвенный покров и проблема создания нормативной базы по влиянию нефтезагрязнения на почвы // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2000. № 2. С. 30-34.

*Эркенова М.И., Толпешта И.И., Трофимов С.Я., Антикаев Р.С., Лазарев А.С.* Изменение содержания нефтепродуктов в загрязненной нефтью торфяной почве верхового болота в условиях полевого эксперимента с использованием извести и удобрений // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1392-1402.

*Anderson, J.P.E., Domsch, K.N.* A physiological method for quantitative measurement of microbial biomass in soil // Soil Biol. Biochem. 1978. № 10. Pp. 215 – 221.

## Влияние пожаров на биологическую активность почв тундры и лесотундры в Ямало-Ненецком автономном округе

*Колмаков А.А.<sup>1</sup>, Хорошаев Д.А.<sup>1, 2</sup>, Соромотин А.В.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия*

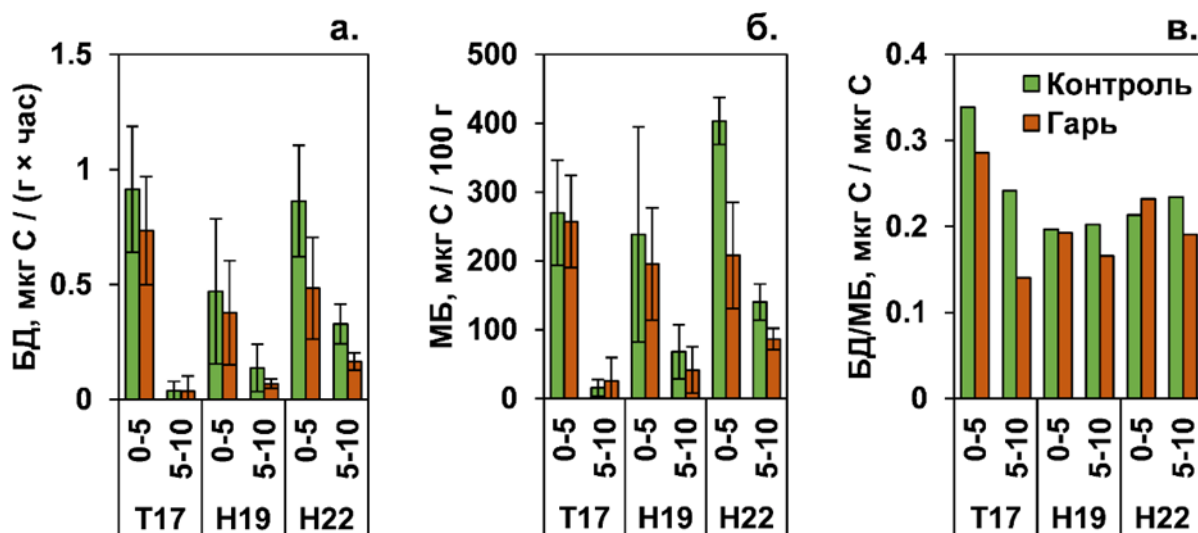
*<sup>2</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пуццино, Россия  
e-mail: a.a.kolmakov@utmn.ru*

Общий запас органического углерода (С) в почвах России составляет около 20% всех мировых запасов. При этом около 67% территории России находится в криолитозоне [Strauss, 2022]. Одним из основных факторов изменения запасов углерода в почве (SOC) являются пожары, учащение которых в последние десятилетия связано с изменением климата в северных широтах. За период 1985-2018 гг. пожарами охвачено 10,5 % территории западносибирской лесотундры [Sizov, 2020]. На территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) нарушенные пожарами экосистемы составляют 1,7% площади округа [Moskovchenko, 2019]. Нарушение экосистемы приводит к уменьшению поглотителей почвенного углерода и возможному смещению природных территорий, что может привести к потере почвенного углерода и деградации земель. Цель работы - оценка влияния пирогенных процессов на биологическую активность почв тундры и лесотундры в Ямало-Ненецком автономном округе.

Исследования проводились на территории Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа (гарь 2017 г.) и в окрестностях г. Надым (гари 2019 г. и 2022 г.). Предварительный выбор участков и разметка на местности проводились по результатам анализа космоснимков (общедоступные снимки с аппарата Sentinel-2) с последующим полевым маршрутным обследованием в июле 2022 г. Гарь 2017 г. представляет равнинный тундровый участок (0,2 км<sup>2</sup>), расположенный в 19 км от п. Газ-Сале (N67°11'16.7", E78°53'27.4"). Растительный покров представлен лишайниками и кустарничками. Гарь 2019 г. затронула участок лесотундры площадью 0,035 км<sup>2</sup> расположенный на холме в 12 км от г. Надым (N65°33'10.7", E72°14'31.6"). Растительный покров представлена березами, лиственницами и лишайником, с редкими кустарничками. Гарь 2022 г. охватила лесной участок площадью 0,015 км<sup>2</sup>, расположенный на холме в 11 км от г. Надым (N65°32'55.1", E72°15'50.8"). Верхний ярус представлен березами и лиственницами, нижние ярусы отсутствовали в связи с недавним пожаром. Ненарушенные контрольные участки подбирались недалеко от гарей с учетом биогеоценотических условий. Суточная скорость дыхания экосистемы, нетто-экосистемный обмен определяли закрытым камерным методом в 5 повторностях на тундровых участках (гарь 2017 г.) и 3-х - на летотундровых (гари 2019 и 2022 гг.) через каждые 3-6 ч с помощью инфракрасного газового анализатора на основе сенсора Senseair K30 (Швеция). После определения суточной эмиссии CO<sub>2</sub> растительный покров внутри камеры срезали для определения биомассы. Из центра каждого основания отбирали почвенные образцы в слое 0-5 см и 5-10 см для определения величины базального дыхания (БД) и микробной биомассы (МБ) в лабораторных условиях. Образцы доводили до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито 2 мм. МБ определяли методом субстрат-индуцированного дыхания после предварительной инкубации почвенных образцов в течении 7 дней. Содержание углерода (С) и азота (N) проводили методом сухого сжигания (VARIO PYRO CUBE, Германия).

Дыхательная активность тундровой почвы на глубине 0-5 см в 20-25 раз превышала дыхание почвы в слое 5-10 см (рис. 1). Для почвы лесотундры это соотношение сократилось до 2.5-5.5. Четкая дифференциация БД и МБ между глубинами 0-5 см и 5-10 см отражала содержание углерода в данных горизонтах: 1.9- 4.5% и 0.5-1.3% соответственно. Участки гарей в целом характеризовались снижением БД на 2-50%, МБ на 5-48% и удельного дыхания микроорганизмов на 2-42%.





**Рис. 1.** Величина базального дыхания (БД, а), микробной биомассы (МБ, б) и удельного дыхания микроорганизмов (в) в образцах почв отобранных с гарей и фоновых территорий гари 2017 г. (Т17), 2019 г. (Н19) и 2022 г. (Н22) на глубине 0-5 см и 5-10 см. Планки погрешностей отражают доверительные интервалы при уровне значимости 5%.

Изменения в функционировании микробоценозов на гарях могут быть связаны со снижением притока свежего органического вещества в почву после выгорания растительного покрова. Разница значений МБ между гарями и фоновыми территориями уменьшалась с увеличением возраста гари, что может отражать процесс восстановления нарушенного растительного покрова. При этом, удельное дыхание микроорганизмов было обратно пропорционально возрасту гарей, что может свидетельствовать об истощении легкодоступного пула органического вещества почвы. В целом можно заключить, что биологическая активность в почвах, ранее испытывавших пирогенную нагрузку снижается, а величина этих изменений зависит от ее давности.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Работа выполнена в рамках реализации Проекта TerrArctic: «Устойчивое землепользование в Арктике в свете глобальных природных изменений: естественные и антропогенные факторы стабильности» в соответствии постановлением Правительства Тюменской области от 24 декабря 2019 г. № 532-п

*Moskovchenko D.V., et al. (2019)* Assessment of the area of natural fires in the territory of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug using remote sensing data. Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug. DOI: 10.26110/ARCTIC.2019.103.2.005.

*Sizov O.S. et al. (2020)* Evaluation of post-pyrogenic dynamics of tundra vegetation in the north of Western Siberia over the last 50 years (1968-2018) based on detailed and high-resolution remote sensing data. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-137-153.

*Strauss J. et al. (2021)* RECARBONIZING GLOBAL SOILS A technical manual of recommended management practices Food and Agriculture Organization of the United Nations. DOI: 10.4060/cb6378en.

## Первичное почвообразование в условиях Крайнего Севера (на примере Воркутинского района Республики Коми)

*Лиханова И.А., Денева С.В., Лантева Е.М.*

*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар, Россия*

*e-mail: likhanova@ib.komisc.ru*

В связи активным техногенным нарушением территорий Крайнего Севера актуальны исследования регенеративных возможностей тундровых экосистем. Первичные сукцессии на техногенных местообитаниях – удобная модель для исследования процессов первичного почвообразования в различных условиях. Цель работы – выявить закономерности формирования почв на аллювиально-морских песчаных/песчано-гравийных отложениях в условиях южной тундры европейской части России.

В 2023 году проведены исследования двух песчаных/песчано-гравийных карьеров месторождения «Участок поля шахты №25» Воркутинского промышленного района. Добыча песка на карьере «Комсомольский-1» проводилась с 1973 по 1987 гг. К моменту исследования продолжительность сукцессии на нем составляла более 36 лет. Карьер «Комсомольский-2» разрабатывается в настоящее время, на его территории исследован ноль-момент восстановительного процесса. На ключевых участках, различающихся степенью гидроморфизма, сделаны почвенные разрезы и дано их морфологическое описание. Химический анализ почвенных образцов проведен согласно общепринятым в почвоведении методам. Запас органического углерода рассчитывался по формуле:  $C_{stock} = C_{conc} \times BD \times d \times (100 - V_{stone}) / 100$ , где  $C_{stock}$  – запас органического углерода в т/га,  $C_{conc}$  – концентрация органического углерода в %,  $BD$  – объемная плотность в г/см<sup>3</sup>,  $d$  – глубина горизонта/слоя в см, а  $V_{stone}$  – доля фракции > 2 мм в % от объема.

В результате техногенного воздействия почвенно-растительный покров, тундровый нано- и мезорельеф уничтожены. Углубление карьеров в процессе их разработки до уровня почвенно-грунтовых вод и, возможно, нарушение мерзлотных условий привело к заболачиванию части территории карьеров. Техногенно-поверхностные образования (ТПО) днища карьеров характеризовались песчаным/супесчаным гранулометрическим составом с преобладанием фракции мелкого песка. Содержание пылеватых и глинистых частиц  $\square$  5.7-17.4%. Содержание кварца достигает 70-80%, полевых шпатов – 5-20%, также присутствуют глауконит (0.5–1%), опал (0.3–4.5%) и другие минералы. Для толщи характерно повышенное содержание кальцита – в среднем 4–6%. В прослоях песчано-гравийных отложениях процент каменистости достигает 90%. Пески, заполняющие прослой галечников, отличаются разнозернистостью и полимиктовым минералогическим составом [Попов, 1961]. Из-за присутствия кальцита реакция среды абралитов – слабощелочная ( $pH_{H_2O} \approx 8$ ). ТПО характеризуются низким количеством органического углерода (как правило, не более 0.1%) и обменных оснований ( $Ca^{2+}$  – 2.4–3.4,  $Mg^{2+}$  – 0.1–0.2 смоль/кг). В гидроморфных условиях верхняя часть отложений характеризуется повышенной кислотностью ( $pH_{H_2O}$  – 7,3), б'ольшим содержанием углерода (1.1%) и обменных оснований ( $Ca^{2+}$  – 7.4,  $Mg^{2+}$  – 0.5 смоль/кг). В целом, дифференциация минеральной толщи абралитов по кислотности, содержанию углерода и обменных оснований не отмечена.

На 36 год сукцессии в автоморфных условиях формируются псаммоземы гумусовые потечно-гумусовые глееватые (W-WC<sup>hi,g</sup>-C); в полугидроморфных – псаммоземы гумусовые грубогумусированные потечно-гумусовые глееватые (Wao- WC<sup>hi,g</sup>-C<sup>g</sup>); в гидроморфных условиях – торфяные эутрофные глеевые иловато-торфяные почвы (TE-TE<sup>mr</sup>-G), а также местами, при близком подстилании песчано-гравийно-каменистых отложений – литоземы перегнойные потечно-гумусовые остаточно-карбонатные (H-Chi-(Csa)-Rsa. На поверхности минеральной толщи формируется микрогоризонт иллювиирования органического вещества с оксидами алюминия (Al) и железа (Fe). Строение профилей мелкопрофильных почв карьеров существенно отличается от фоновых почв: подзолов

иллювиально-гумусовых глееватых криотурбированных мерзлотных (O–EВH@–ВH–Bg–C⊥), сформированных на песчаных/супесчаных породах в автоморфных условиях центральных частей дренированных блоков, и торфяно-подбуров глеевых мерзлотных (Г–ВНF–G–CG⊥), характерных для условий переходной зоны от блоков к заболоченным ложбинам.

В ряду увеличения гидроморфизма в почвах карьера наблюдается увеличение мощности органогенных/органо-минеральных горизонтов (от нескольких мм до 13 см), содержания в них углерода (от 2.7 до 24.5 %), обменных кальция (от 5 до 64 смоль/кг) и магния (от 0.7 до 7.26 смоль/кг). Минеральная часть профиля молодых почв изменена слабо, отмечено только возрастание кислотности верхней части профиля, где значения  $pH_{H_2O}$  составляли 7,0-7,6. Почвы фоновых участков более кислые ( $pH_{H_2O}$  – 4-5). В подзолах, несмотря на проявления криотурбационных процессов, выражен элювиально-иллювиальный характер распределения оксалаторастворимых соединений Al и Fe.

В абралитах запасы углерода в слое 0-20 см составляют 2-3 т/га. На 36 год сукцессии в автоморфных условиях почвообразования показатель увеличивается до 5 т/га, полугидроморфных – 17 т/га, гидроморфных – от 27 до 37 т/га. Запасы органического углерода в почвах карьеров в 5 раз меньше, чем фоновых автоморфных (26 т/га) и погугидроморфных (77 т/га). Скорость накопления углерода в автоморфных условиях почвообразования составляет всего  $0.08 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ , полугидроморфных –  $0.40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ , гидроморфных –  $0.68-0.97 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ .

В вегетационный период почвы карьеров теплее, чем фоновые почвы. В июле температура фоновых почв на глубине 40 см составляла около  $5^\circ\text{C}$ , абралитов  $\approx 14^\circ\text{C}$ , псаммоземов  $\approx 11^\circ\text{C}$ .

Выявлено, что ведущими процессами почвообразования в четвертом десятилетии сукцессии в условиях южной тундры являются формирование органо-аккумулятивных горизонтов и гумусонакопление, их интенсивность определяется в значительной степени условиями влажности субстратов. Минеральная толща изменена слабо, фиксируется подкисление верхней части профиля, морфологически выражены глеевые процессы.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена в рамках темы НИР «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

*Попов А.И.* Отчет о производстве геологической съемки масштаба 1:50000 в Воркутинском промышленном районе (листы Q-41-20 и Q-41-21). Москва. 1963.

## Сравнительная оценка экологической значимости различных почв геосистем криолитозоны Большеземельской тундры

Мачулин Д.Л.

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Волгоград, Россия  
e-mail: dmachulin@yandex.ru*

В условиях усиливающейся промышленной экспансии на Север с его уязвимыми экосистемами, приуроченными к криолитозоне, даже незначительное воздействие на природные ландшафты может привести к региональной дестабилизации биосферы. Для использования территории в хозяйственном обороте целесообразно иметь представление об относительной экологической значимости ландшафтов и ориентироваться на участки, вовлечение которых в интенсивное использование минимизирует утрату её биосферных функций. Одним из показателей экологической значимости урочищ криолитозоны является устойчивость почв к загрязнениям и механическим воздействиям, так как именно через почву можно оценить риск деградации конкретного урочища/ландшафта и соседствующих с ним территорий.

Цель данного исследования – оценка относительной экологической значимости почв подзоны сплошного распространения многолетнемерзлых пород Большеземельской тундры, приуроченной к зоне тундр региона.

Зона тундры (типичная и южная кустарниковая подзоны) административно располагается главным образом в Ненецком автономном округе, а также небольшим фрагментом в Республике Коми. Территория принадлежит к бассейну р. Печора (Печорская равнина), относится к холодному биоклиматическому поясу. Тундровые ландшафты представлены сочетаниями различных урочищ, для систематизации которых использовалась региональная схема ландшафтной типизации [Осадчая и др., 2016]. В соответствии с ней урочища сгруппированы по типу растительности в 3 зональные группы: болотные, торфяники, тундровые и одну интразональную – пойменную. Внутри групп почвы группируются по видам урочищ. В целом процесс почвообразования развивается по глеево-болотному типу на фоне преимущественного развития сливающихся многолетнемерзлых пород, короткого лета и низких температур воздуха. Почвы обеднены основаниями, но обогащены Fe и Al; приповерхностные грунты (преимущественно суглинки) имеют слабую водопроницаемость.

Оценка почв проводилась по двум критериям, включающим четыре параметра [Мачулина и др., 2022]: 1) неустойчивость, или экологическая уязвимость – неспособность почвы к естественному восстановлению после антропогенных воздействий – механического нарушения и нефтяного загрязнения; 2) неспособность к аккумуляции органических и неорганических поллютантов – углеводов (УВ) и тяжелых металлов (ТМ), т. е. неспособность почвы защищать сопредельные среды и сопряженные ландшафты от вторичного загрязнения. При ранжировании в расчет принимались базовые физико-механические характеристики почв, а также мощность торфяного горизонта и принадлежность к определенному элементу мезорельефа. При максимальной устойчивости, наилучшей способности к самовосстановлению, малой подверженности эрозии почвам присваивался 1 балл. Чем выше балл, тем участок более ценный, тем осторожнее с ним нужно обращаться (табл. 1).

Максимальную неустойчивость (4 балла) имеют тундровые урочища, полигональные, полигонально-валиковые торфяники и хасыреи. Это связано с медленным восстановлением кустарников и лишайников, высоким потенциалом развития экзогенных процессов (эрозия, солифлюкция, термокарст, дефляция). Для остальных урочищ значения носят промежуточный характер. Устойчивость почв к углеводородному загрязнению (самоочищающая способность) при одинаковых масштабах воздействия зависит от

возможности миграции и выноса жидких углеводов с поверхностными и грунтовыми водами за пределы почвенного профиля, а также от интенсивности процессов окисления и биodeградации углеводов.

Высокую способность к восстановлению после нефтяного загрязнения (минимальная неустойчивость – 1 балл) имеют аллювиальные дерновые и аллювиальные дерновые глеевые почвы (поемные урочища). Следом за ними идут тундровые урочища с участками несливающейся мерзлоты – соответственно 2 и 2,5 балла. Низкой устойчивостью характеризуются песчаные почвы урочищ водоразделов – 2,5-3 балла; немного выше – 3,5 балла – у болотных почв. Наименее защищены (3,5-4 балла) почвы урочищ блоково-рядовых, крупно- и среднеблочных тундр, торфяников и хасыреев, что связано с преимущественным или повсеместным распространением в них сливающихся многолетнемерзлых пород, с неблагоприятными гидротермическими условиями. Недостатком такой оценки является «усреднённость»: участок может иметь низкий общий балл, но будет абсолютно не подходящим для предполагаемой деятельности (как, например, аллювиальные почвы).

Почвы и комплексы почв	Неустойчивость к антропогенным воздействиям			Неспособность к аккумуляции		Средний балл
	Механическое нарушение	Нефтяное загрязнение		ТМ	Нефтепродукты	
		Жидкие УВ	Тверд. УВ			
Болотные верховые торфяно-глеевые и торфяные	1	3,5	3,5	1	1	2
Комплекс болотных верховых торфяных мерзлотных и тундровых остаточно-торфяных мерзлотных (плоскобугристые торфяники)	2	4	4	1	1	2,4
Комплекс болотных верховых торфяных и тундровых остаточно-торфяных мерзлотных (выпуклобугристые торфяники)	4	4	4	1	1	2,8
Комплекс тундровых поверхностно-глеевых оподзоленных, тундровых поверхностно-глеевых сухоторфянистых и почв пятен						
– на участках со сливающейся мерзлотой	4	3	3,5	2	2,5	3
– на участках с несливающейся мерзлотой	4	2	2,5	2	2,5	2,6
Комплекс тундровых иллювиально-гумусовых оподзоленных и их сухоторфянистых аналогов (песчаный субстрат)	4	2,5	3,5	2	3,5	3,1
Аллювиальные дерновые (в т. ч. примитивные слоистые) и аллювиальные дерново-глеевые почвы	2	1	1	2	4	2

Табл. 1. Оценка функций почв.

Предложенный подход позволяет выбрать наиболее подходящий с точки зрения экологической значимости участок для размещения промышленных объектов, в т. ч. линейных, и в целом оптимизировать схему территориального планирования. Для криолитозоны это означает усиление всех базовых индикаторов устойчивого развития.

*Мачулина Н.Ю., Лазарева В.Г., Мачулин Д.Л.* Сравнительная оценка экосистемных функций почв репрезентативных урочищ подзоны сплошного распространения многолетнемерзлых пород Большеземельской тундры // Естественные и технические науки, 2022, № 6 (169). С. 181-187.

*Осадчая Г.Г., Тумель Н.В., Королева А.М.* Морфологическая структура криогенных ландшафтов Большеземельской тундры // Криосфера Земли, 2016. Т. XX, № 3. С. 14-23.

## Восстановление почв в посттехногенных ландшафтах арктической и субарктической зоны Якутии

*Петров А.А.*

*Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера  
имени профессора Д.Д. Саввинова, Якутск, Россия  
e-mail: Petrov\_Alexey@mail.ru*

В настоящее время прослеживается четкая тенденция роста техногенных земель, и отсюда очевидна необходимость восстановления техногенно нарушенных земель и введение их в хозяйственный оборот. Самовосстановление техногенно нарушенных ландшафтов на Севере протекает крайне медленными темпами, а практически любое воздействие техники отражается на функционировании естественных экосистем. В этой связи, главной задачей становится ускорение процесса восстановления экосистем.

Исследованы молодые почвы и грунты, сформированные на техногенно нарушенных территориях Арктической и Субарктической части Якутии. Исследованиями охвачены отвалы вскрышных пород россыпных месторождений алмазов и олова в Лесотундровой равнинной провинции Тундрово-лесной почвенно-растительной подзоны и в Верхоянской горно-гольцово-тундрово-таежной провинции Северно-таежной почвенно-растительной подзоны [Атлас ..., 1989]. Высота отвалов достигает до 15-20 м., уклон склонов составляет 20-30°. Эти отвалы сформированы из потенциально плодородных пород, которые представляют собой смесь мелкозема и гравия, извлеченные с пойм рек и ручьев. Также были исследованы отвалы вскрышных пород разработки коренных месторождений алмазов, которые расположены в Вилюйско- Оленкеской таежной провинции Северотаежной почвенно-растительной подзоны и представляют собой аккумулятивные формы неорельефа, имеющие трапециевидные формы. Эти отвалы относятся к платообразным террасированным очень высоким отвалам высотой до 70 м с уклоном до 45°. Тело отвалов сложена доломитами, известняками, доломитовыми мергелями, алевролитами, доломитами и известняками. На отвалах карьера «Удачный» частично сформированы техноземы.

Согласно классификации почв техногенных ландшафтов [Курачев В.М., 1989], основу структуры почвенного покрова изученных отвалов вскрышных пород Северной Якутии составляют представители трех классов: биогенно-неразвитые почвы, литогенно-неразвитые почвы и техноземы трансформируемые. Эти классы подразделяются на девять типов.

Представители класса биогенно-неразвитых почв формируются в основном на отвалах вскрышных пород разработки россыпных месторождений, где исходные грунты извлекаются из русел рек и ручьев и аккумулируются на бортах карьеров. В зависимости от появления органогенных горизонтов здесь выделили эмбриоземы инициальные, органо-аккумулятивные, дерновые и перегнойно-торфянистые.

Разработка коренных месторождений алмазов открытым способом в карьерах «Айхал» и «Удачный» привела к образованию крупно-карьерно-отвалных комплексов. Отвалы вскрышных пород сложены массивно-кристаллическими горными породами, которые слабо подвергаются выветриванию в условиях гипергенеза.

Почвы класса «Литогенно-неразвитых» представляют собой примитивные почвы, характеризующиеся развитием процессов, направленных на подготовку субстрата к почвообразованию, главным образом, путем разрыхления плотных пород. В зависимости от наличия органогенных горизонтов были выделены элювиоземы инициальные, органо-аккумулятивные и мохопокрытые.

Самовосстановление почвенного покрова на отвалах разработки коренных месторождений алмазов из-за малого содержания мелкозема и высокой каменистости развивается крайне медленными темпами. Описанные типы в стадии накопления органики распространены на незначительных площадях. На отвалах карьера «Удачный» в целях ускорения зарастания отвалов растительностью были сформированы техноземы.

Почвы класса «Техноземы трансформируемые» сформированы технологическими приемами рекультивации, на тело отвалов был нанесен слой песчаного и супесчаного грунта. Органогенный горизонт не был сформирован и грунты оставлены под самозаращение. Поэтому мы рассматриваем данные техноземы как саморазвивающейся системы под воздействием естественных почвообразовательных факторов, а техногенность считаем начальной спецификой. Здесь выделили техноземы недифференцированные инициальные и органо-аккумулятивные. Такие почвы формируются как под травянистыми, так и под кустарниковыми растительными сообществами.

Анализ физико-химических показателей молодых почв показал, что между классами и типами отмечаются отличия показателей по содержанию мелкозема, физической глины, органического углерода и общего азота. Пределы колебаний каменистости и мелкозема между типами и классами не перекрываются, что позволяет использовать эти показатели для диагностики таксонов и можно сказать, что на начальных этапах развития молодых почв определяющую роль играет механический состав исходных грунтов.

Высокую корреляционную связь имеют следующие показатели: типы – каменистость (-1), Сорг – Нобщ (0,9), физическая глина – Нобщ (0,8), физическая глина и Сорг (0,7). Для выделения типов молодых почв и грунтов посттехногенных ландшафтов Северной Якутии высокую корреляционную связь имеют каменистость (мелкозем), общий азот, органический углерод и реакция среды. Эти же показатели оказывают наибольшее влияние на развитие молодых почв.

На отвалах вскрышных пород Северной Якутии выделены три стадии эволюционного развития молодых почв: «инициальная», «органо-аккумулятивная» и «дернообразования». Стадия «дернообразования» выделена только у представителей класса биогенно-неразвитых почв на отвалах разработки россыпного месторождения алмазов. Процесс почвообразования на отвалах разработки открытым способом коренных месторождений алмазов достигает лишь до стадии накопления органики на небольших участках. Восстановление таких отвалов возможно, только с формированием техноземов или с применением технологий с искусственными субстратами.

Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. М.: ГУГК при СМ. – М.: главное управление геодезии и картографии при СМ СССР, 1989. 115 с.

Курачев В.М. Классификация почв техногенных ландшафтов / Курачев В.М., Андроханов В.А. // Сибирский экологический журнал. 2002. № 3.

## Биологическая активность в нефтезагрязненных почвах Норильского региона

*Розанова М.С., Семина О.Ю.*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
e-mail: rozanova\_ms@mail.ru*

Особенностью арктических экосистем является высокая чувствительность ко всем видам воздействий, как естественных, так и антропогенных, а также их низкая устойчивость. Норильский регион является одним из динамично развивающихся богатых запасами полезных ископаемых регионов Сибири, активная разработка и добыча которых может наносить ущерб объектам окружающей среды. Известно, что биогеоценозы криолитозоны представляют собой особый элемент биосферы, характеризующийся низкой ёмкостью биологического оборота, мозаичностью почвенного и растительного покрова, бедностью видового состава фитоценозов и их низкой биопродуктивностью. Это означает, что при техногенном разрушении участков биогеоценозов в процессе добычи полезных ископаемых и/или другого техногенного воздействия возможности биоты к самовосстановлению в постэксплуатационный период являются очень ограниченными. При загрязнении почв нефтью и нефтепродуктами (НП) происходит значительное изменение свойств почв, проявляющееся не только в изменении в режимах аэрации, промачивания и т.д., но и в изменении условий функционирования микробных сообществ и скорости протекания реакций накопления-разложения органического вещества (ОВ).

Объектами исследования выбраны почвы, широко распространенные в районе г. Норильска (криозем грубогумусовый глееватый, глеезем криометаморфический криотурбированный, глеезем грубогумусированный, аллювиальная дерновая глеевая, подбур грубогумусированный и аллювиальная темногумусовая глееватая), загрязненные разными концентрациями НП. В почвах определяли содержание нефтепродуктов, органического углерода (Сорг), углерода водорастворимых органических соединений (Свов) общепринятыми методами. Кроме того, определяли базальное дыхание (БД) и субстрат-индуцированное дыхание (СИД) почв методом, описанным в [Ананьева и др., 2011]. Содержание микробной биомассы (Смик), рассчитывали по СИД [Anderson, Domsch, 1978].

В таблице представлены полученные результаты по распределению НП в почве почвенных профилей, которые сопоставляются с биологическими, химическими и физико-химическими свойствами почв (табл. 1). Кроме того, распределение НП сопоставляется с физическими свойствами почвенных профилей (плотность, порозность, трещиноватость, гранулометрический состав), а также с глубиной залегания толщи многолетнемерзлых пород, которая является водоупором: в криоземе – горизонт С; в подбуре тундровом – горизонт ВС.

Максимальное содержание ОВ приурочено к верхним органогенным горизонтам. Величина базального дыхания (БД) показывает доступность питательного субстрата для микроорганизмов и интенсивность процессов минерализации ОВ; СИД отражает активность микробного сообщества; количество микробной биомассы характеризует его потенциал. Относительно высокое БД характерно для верхних органогенных горизонтов, даже при повышенном содержании НП (например, аллювиальная дерновая глеевая почва). Повышение интенсивности БД с глубиной может быть связано с повышением содержания водорастворимых органических соединений углерода (Свов) (профиль подбура тундрового, горизонт АО), а также с повышением рН, что влечет за собой снижение содержания токсичных для микробиоты растворимых соединений алюминия. Содержание микробной биомассы - высокое в органогенных горизонтах (профиль торфяно-глеезема криотурбированного), но в минеральных горизонтах с возрастанием содержания НП Смик снижается. Почвенные микроорганизмы могут отвечать на загрязнение НП повышением валовой численности и увеличением активности.



Горизонт	БД (мкг С-СО <sub>2</sub> /ч×г почвы)	Смик (мкг С-СО <sub>2</sub> /г почвы)	НП, мг/кг	Сорг, %	Свов, %	pH <sub>H2O</sub>
Криозем						
О	0,56	184,1	687	8,16	0,05	4,39
АО	0,71	440,0	826	2,17	0,01	5,10
CR	0,33	150,5	922	1,17	0,02	6,39
BC	0,59	210,2	450	0,68	0,01	6,40
С	0,60	205,1	701	0,44	следы	6,36
Торфяно-глеезем криотурбированный						
T1	0,89	1075,6	900	19,58	0,04	5,50
T2	0,88	824,2	1427	28,82	0,03	6,77
Gctr	0,67	190,4	1707	2,64	следы	7,35
CRM	0,48	116,8	754	1,84	0,01	7,26
Тундровая глеевая почва						
О	1,29	696,3	608	22,64	0,02	6,22
АО	1,10	931,7	1170	10,10	0,05	6,29
Bg	0,63	113,6	734	1,24	0,03	7,19
G	0,29	685,7	1509	2,03	0,01	6,94
CG	0,55	73,5	548	2,08	0,03	6,71
Аллювиальная дерновая глеевая почва						
AУ	1,66	358,8	1582	2,17	0,01	6,22
G	0,67	257,9	1531	0,80	0,01	7,82
Cg	0,75	180,3	677	1,14	0,02	6,19
Подбур тундровый						
О	0,55	239,7	1564	16,82	0,03	5,60
АО	0,83	437,4	1843	18,12	0,08	5,92
BHF1	0,17	156,3	618	2,35	0,02	6,29
BHF2	0,68	63,4	664	1,51	0,01	6,47
BC	0,36	100,1	1566	1,93	0,01	6,45
Аллювиальная лугово-болотная почва						
AУ	1,17	588,2	662	8,47	0,04	5,85
T	0,82	247,0	932	6,87	0,02	5,58
Ag	0,36	227,7	931	1,15	0,01	6,56
Bg1	0,23	548,2	680	0,23	0,01	6,90
Bg2	0,54	162,8	791	0,38	0,02	6,92
G	0,30	124,6	700	0,49	0,02	7,20

**Табл. 1.** Распределение НП по почвенному профилю и показателей химических, физико-химических и биологических свойств загрязненных почв в окрестностях г. Норильска.

Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г. Особенности определения углерода микробной биомассы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1327- 1333  
 Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil // Soil Biol. & Bioch., 1978, V. 10. P. 215-221.

## Ферментативная активность почв Норильского региона, загрязненных нефтепродуктами

*Семина О.Ю., Розанова М.С.*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
e-mail: sem\_olga02@mail.ru*

Место арктических и субарктических территорий, которые частично включают в себя таежные зоны, значительно в экологическом равновесии Северного полушария. Северные территории регулируют поступление кислорода и метана, а также относятся к районам с глобальными атмосферными процессами [Юркевич, 2021]. Север Красноярского края – один из богатейших регионов Сибири по запасам полезных ископаемых, при добыче и транспортировке которых может наноситься ущерб объектам окружающей среды.

Загрязнение почв нефтью и нефтепродуктами (НП) приводит к значительным изменениям физических, химических и биологических свойств почвы. При попадании нефти и НП на поверхность почвы происходит угнетение биологической активности. Почвенные микроорганизмы отвечают на нефтяное загрязнение после кратковременного ингибирования повышением своей численности и усилением активности. Прежде всего это относится к углеводородокисляющим микроорганизмам, количество которых резко возрастает в незагрязненных почвах. В результате микробное сообщество становится неустойчивым. По мере разложения нефти в почве общее содержание микроорганизмов приближается к фоновым значениям, но количество нефтеокисляющих бактерий в течение длительного времени (в почвах южной тайги до 10-20 лет) превышает их численность в незагрязненных почвах. Кроме того, нефтяное загрязнение дестабилизирует фотосинтетическую активность растительных организмов. Это сказывается прежде всего на развитии и функционировании почвенных водорослей. В зависимости от дозы нефти и НП, а также сохранности почвенного и растительного покрова наблюдается разная реакция почвенных водорослей: от частичного угнетения и замены одних группировок другими до выпадения отдельных групп или полной гибели всей популяции. Загрязнение почв оказывает отрицательное влияние и на почвенных животных, вызывая их массовое угнетение из-за недостатка кислорода и питательных веществ.

Был исследован широкий набор почв, отобранных в районе г. Норильска (криозем грубогумусовый глееватый, глеезем криометаморфический криотурбированный, глеезем грубогумусированный, аллювиальная дерновая глеевая, подбур грубогумусированный и аллювиальная темногумусовая глееватая), содержащих разное количество НП. По профилю почв были определены следующие показатели: активность каталазы и инвертазы, содержание Сорг и НП общепринятыми методами.

Неравномерность распределения НП по почвенному профилю связана с разной плотностью сложения, порозностью и глубиной залегания многолетнемерзлых пород (табл. 1). Накопление НП в профилях почв имеет свои особенности: в криоземе грубогумусовом глееватом максимальное их содержание приурочено к горизонту CR (криотурбированному), в глеезем криометаморфическом криотурбированном – к горизонту Gctr, в глеезем грубогумусированном – к горизонту G (глеевому), в аллювиальной дерновой глеевой – к горизонту AY (серогумусовому), в подбуре грубогумусированном – к горизонтам AO и BC, а в аллювиальной темногумусовой глееватой – к горизонту AU2 (темногумусовому).

Максимальное содержание органического углерода (Сорг) обнаружено в верхних органогенных горизонтах, что связано с максимальным содержанием растительных остатков разной степени разложения.

Активность каталазы практически во всех вариантах характеризуется «очень бедными» и «бедными» значениями по классификации Д.Г. Звягинцева. Максимальная активность каталазы определена в темногумусовом горизонте (AU1) аллювиальной темногумусовой глееватой почвы и в серогумусовом горизонте (AY) аллювиальной дерновой глеевой почвы. По активности инвертазы практически все горизонты почв относятся к градации «очень бедные» (<5 мг глюкозы/г\*сут<sup>-1</sup>), исключение составляет торфяной горизонт глеезема криометаморфического криотурбированного, богатый органическим веществом.

Название почв	Горизонт	Каталаза,* (см <sup>3</sup> /г*мин <sup>-1</sup> )	Инвертаза,* (мг глюкозы/г*сут <sup>-1</sup> )	НП, мг/кг	Сорг, %
Криозем грубогумусовый глееватый	O	1,27	2,59	687	8,16
	AO	0,29	0,57	826	2,17
	CR	1,05	0,34	922	1,17
	BC	2,76	0,34	450	0,68
	C	2,59	0,38	701	0,44
Глеезем криометаморфический криотурбированный	T1	1,30	1,46	900	19,58
	T2	1,51	29,90	1427	28,82
	Gctr	0,95	0,41	1707	2,64
	CRM	1,82	0,29	754	1,84
Глеезем грубогумусированный	O	1,21	1,35	608	22,64
	AO	0,76	2,20	1170	10,10
	Bg	1,44	0,32	734	1,24
	G	1,78	0,31	1509	2,03
	CG	1,76	0,32	548	2,08
Аллювиальная дерновая глеевая	AY	9,41	1,43	1582	2,17
	G	1,09	0,31	1531	0,80
	Cg	2,77	0,65	677	1,14
Подбур грубогумусированный	O	0,66	1,68	1564	16,82
	AO	0,56	1,63	1843	18,12
	BHF1	0,38	0,47	618	2,35
	BHF2	1,99	0,36	664	1,51
	BC	1,74	0,29	1566	1,93
Аллювиальная темногумусовая глееватая	AU1	14,45	4,76	662	8,47
	AU2	2,62	1,60	932	6,87
	AUG	1,06	0,46	931	1,15
	Bg1	1,12	0,44	680	0,23
	Bg2	1,26	0,35	791	0,38
	G	3,04	0,30	700	0,49

**Табл. 1.** Распределение нефтепродуктов и органического углерода в загрязненных почвах, а также их ферментативной активности по почвенным профилям, заложенным в районе г. Норильска

**Примечание.** \*определено по (Белов А.А., Чепцов В.С., Лысак Л.В., 2020)

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Авторы выражают благодарность сотрудникам факультета почвоведения МГУ – Демину В.В., Завгородней Ю.А., Белову А.А. за консультации и помощь в выполнении исследований.

*Белов А.А., Чепцов В.С., Лысак Л.В.* Методы идентификации почвенных микроорганизмов. – Москва: МАКС Пресс, 2020. – 196 с.

*Юркевич Н.В. и др.* Техногенное воздействие на окружающую среду в Российской Арктике на примере Норильского промышленного района// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 12. С. 230–249.

## Response of carbon and microbial properties to risk elements pollution in Arctic soils

*Xiaowen Ji*<sup>1</sup>, *Evgeny Abakumov*<sup>2</sup>, *Vyacheslav Polyakov*<sup>2</sup>, *Xianchuan Xie*<sup>3</sup>

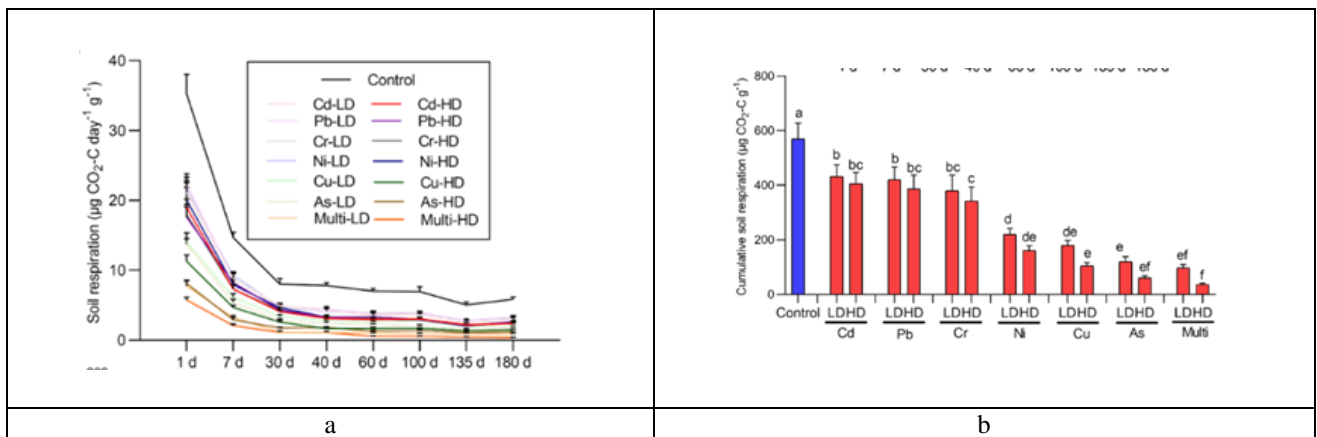
<sup>1</sup>*School of Environment and Sustainability, University of Saskatchewan, Saskatoon SK, S7N 5B3, Canada*

<sup>2</sup>*Department of Applied Ecology, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199178, Russian Federation*

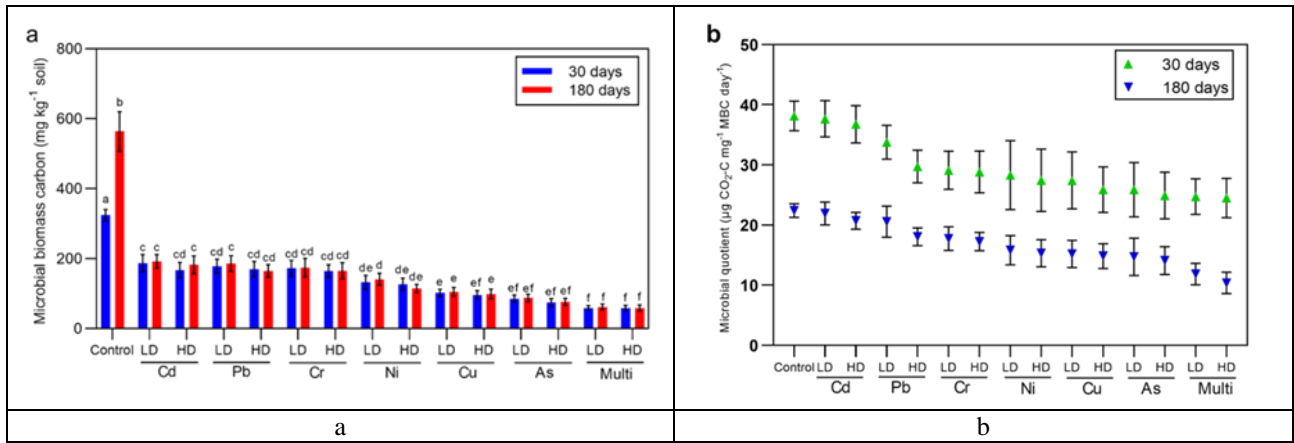
<sup>3</sup>*Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, School of Resources Environmental & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, PR China*

*The corresponding author: Xiaowen Ji xij938@mail.usask.ca / jixiaowen4321@qq.com*

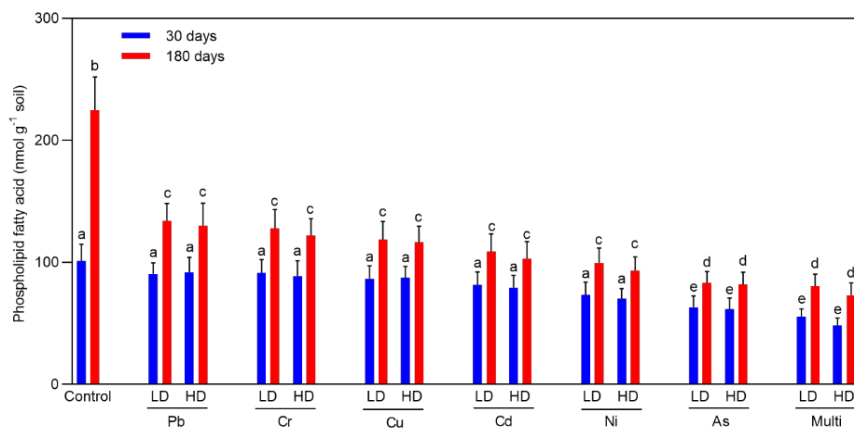
A 180-day incubation study was conducted to evaluate the effects of risk elements (REs) on organic carbon use and microbial activities in organic soils in the Arctic during the summer snowmelt period. Soils were artificially spiked with Cd, Pb, Cr, Ni, Cu, As, and a combination of these REs according to the levels measured in Arctic soils from REs-polluted industrial sites. During the incubation period, microbial activities, and microbial biomass carbon (MBC) formation were inhibited (Fig. 1), and microbial quotient ( $q\text{CO}_2$ ) values were relatively high in the spiked soils indicating that more energy was used by microbes for maintenance under REs stress (Fig. 2). Meanwhile, microbial metabolism was significantly restrained. Microbial Specific phospholipid fatty acids (PLFAs) were reduced in RE spiked soils relative to the control, especially in the As- and multi-RE-spiked soils. The abundance of both fungi and bacteria was reduced in response to RE amendments by 14–24 % and 1–55 %, respectively. PLFA biomarkers indicated a shift in soil microbial community structure and activities influenced by REs (Fig. 3), consequently having a negative effect on soil organic carbon degradation. This study addresses the knowledge gap regarding the alternation of biochemical reactions in Arctic soils under anthropogenic REs with relevant contamination levels.



**Fig. 1.** Soil respiration (a) and cumulative evolved CO<sub>2</sub>-C from soils under different risk elements (RE) amendments (b) during 180 days of incubation (n = 3). Control represents background soils; HD and LD represent high and low doses of RE amendment, respectively. Data are shown as means with standard deviation. Different letters in individual treatments indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) among the control and different treatments.



**Fig. 2.** Microbial biomass carbon (a) and microbial quotient (b) in different treatment soils (n = 3). Control represents background soils; HD and LD represent high and low doses of RE amendment, respectively. Data are shown as means with standard deviation. Different letters in individual treatments indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) among the control and different treatments.



**Fig. 3.** Microbial phospholipid fatty acids (PLFAs) content (n = 42) under RE stress. Data are shown as means with standard deviation. Different letters in individual treatments indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) among the control and different treatments. Control represents background soils; HD and LD represent high and low doses of RE amendment, respectively. No significant differences ( $p > 0.05$ ) were found among different REs treatments at 30 and 180 days.

## СЕКЦИЯ 7. ГОРОДСКИЕ И АГРОГЕННЫЕ ПОЧВЫ КРИОЛИТОЗОНЫ

---

### Почвы урбанизированных экосистем Ямало-Ненецкого автономного округа

*Абакумов Е.В.<sup>1</sup>, Моргунов Е.Н.<sup>2</sup>, Печкин А.С.<sup>2</sup>, Низамутдинов Т.И.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Научный центр изучения Арктики, Салехард-Надым, Россия*

*e-mail: e\_abakumov@mail.ru, e.abakumov@mail.ru*

Население Арктического пояса РФ крайне урбанизировано, доля городского населения в различных опорных зонах оценивается в 80-85%. Урбанизированные экосистемы приурочены, как правило, к небольшим по численности населения и занимаемой площади городам и смежным поселкам. Городские поселения создавались на территориях, занятых легкими по гранулометрическому составу относительно дренированных почвообразующих породах, во многих случаях они окружены тундрами на переувлажнённых суглинках и глинах. Почвообразование в городах ЯНАО представлено тремя основными типами морфогенеза: (1) урбаноземы и урбоестественные почвы собственно городских функциональных зон; (2) техноземы и техногенные почвоподобные тела промышленных и транспортных объектов (при их строительстве часто завозятся песчаные породы, что существенно изменяет не только водный режим почв, но и фито- и зооценозы) и (3) разнообразные агропочвы, формирование которых территориально и исторически связано с локализацией земледелия вблизи арктических поселений.

Электрофизические исследования на площадках многолетнего мониторинга показали, что мощность деятельного слоя увеличивается как в городских, так и тундровых экосистемах, при этом многолетнемерзлые породы залегают в почвах городов глубже, что связано как влиянием антропогенного фактора, так и гранулометрическим составом почв и пород. Растворение мерзлоты приводит к тому, что не все почвы г. Салехард могут классификационно относиться к кройземам или гелисолям, поскольку мерзлота углубляется и все менее влияет на криогенный массообмен и почвообразовательный процесс. В городских почвах формируется выраженный гумусовый или дерновый горизонт, что связано с интродукцией травянистых и кустарниковых растений, а также внесению органических и, реже, органоминеральных удобрений. Профили почв парков содержат гумусовый горизонт мощностью до 20 см, в то время как для тундровых почв это вовсе не характерно. В городских почвах реже выражен глеевый процесс, но остается редоксиморфная окраска. Техноземы и конструкторы в некоторых случаях характеризуются мощностью профиля до 1,5 м., где существуют как собственно почвенные горизонты, так и насыпные, в том числе и токсичные слои грунта.

Содержание основных органических и неорганических токсикантов незначительно превышает ПДК почти во всех изученных объектах (верхний слой). Это связано, как с невысокой техногенной нагрузкой собственно на территории городов (исключение составляет пос. Харп), так и с криогенным перераспределением токсикантов в срединную и надмерзлотную части почвенного профиля, что необходимо учитывать при проведении санитарно-гигиенических и экотоксикологических исследований. Агропочвы городских экосистем представлены агроземами, агроподзолами, агроальфегумусовыми, а также

агроконструктоземами (теплицы, питомник В. Бурко (*к сожалению, ушедшего из жизни весной 2023 г.*) в окрестностях Салехарда). Эти почвы имеют старопахотный гумусовый горизонт мощность до 30 см. В окрестностях г. Надыма на заброшенных картофельных полях (отданных под дачные участки в 2017 г.) встречаются турбированные агроземы образованные в результате плантажной вспашки и осушения. Сейчас они повторно вовлекаются в сельское хозяйство. В практике некоторых коми-поселенцев в окрестностях пос. Аксарка использование рыбных компостов в качестве пищи для коров и приготовления компоста. Здесь созданы очень небольшие (30 кв. м.) почвы типа плагген с мощным гумусовым горизонтом, изолированные от холодной почвенной массы деревянным полом. Сельское хозяйство, таким образом, является мощным фактором, хотя и очень локальным, трансформации экосистем и морфогенеза почв.

Еще один тип криогенных почв, заслуживающий особого внимания – плаггены со множеством археологических артефактов, ареал которых находится в Комяцкой деревне на территории и г. Лабытнанги. Как правило почвоведы, приезжая на Ямал устремляются в тундру или тайгу останавливаясь в городах на день-два. Но эти города хранят огромные пласты информации о генезисе, морфологии, современной антропогенной динамике почв и не могут быть незаслуженно забыты при организации мониторинговых и проектно-исследовательских работ. Кроме того, многие представители городских почв могут стать потенциальными объектами Красной книги почв ЯНАО и объектами музеификации в качестве монолитов.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Авторы выражают благодарность Правительству ЯНАО за всестороннюю поддержку. Работы была выполнена при поддержке НЦМУ «Агротехнологии будущего» и грантов РФФИ-ЯНАО №№ 19-416-89002, 18-44-890003.

## Эмиссия CO<sub>2</sub> и продуктивность различных газонных конструкций в условиях Субарктики

*Давыдова П.Д.<sup>1</sup>, Корнейкова М.В.<sup>2</sup>, Слуковская М.В.<sup>1,2</sup>, Салтан Н.В.<sup>1</sup>, Заводских М.С.<sup>1</sup>, Саржанов Д.А.<sup>1</sup>, Иващенко К.В.<sup>1,3</sup>, Васенев В.И.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Лаборатория smart-технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

<sup>2</sup>Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

<sup>3</sup>Лаборатория карбомониторинга наземных экосистем, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

Повышение концентрации климатически активных газов в атмосфере, в частности, диоксида углерода, является большой проблемой современности как на глобальном, так и на локальном уровне. В условиях города заметный вклад в общий поток CO<sub>2</sub> в атмосферу вносят почвы, в том числе почвенные конструкции газонов, технологии создания которых на практике не учитывают баланс углерода. Между тем, изучение динамики потоков CO<sub>2</sub> и продуктивности газонов необходимо для разработки экологически обоснованных решений в городском ландшафтном планировании, что особенно актуально для регионов с коротким периодом вегетации. Целью исследования является оценка эмиссии углекислого газа и биомассы растительного покрова в различных почвенных конструкциях, функционирующих в условиях Субарктики, для выявления наиболее оптимального варианта с точки зрения баланса углерода.

Весной 2020 года на территории Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина Кольского научного центра РАН (г. Апатиты Мурманской обл.) был создан экспериментальный стационар, включающий три варианта почвенных конструкций (n=3) площадью 2 м<sup>2</sup> и мощностью почвосмесей 15 см: 1) ТП, торф: песок 1:1; 2) ТПГ – торф: песок: подстилающий суглинок 1:1:1; 3) ТПО – двухслойная технология (слой 5-15 см – смесь торфа и песка 1:1, слой 0-5 см – смесь торфа, песка и вермикулит-лизардитовых горнопромышленных отходов 1:1:1). Травосмесь была универсальной и включала *Lolium perenne* L., *Festuca rubra* L. и *Poa pratensis* L. в соотношении 30:35:35 по массе. Для каждой из конструкций были применены три варианта создания газонного покрытия: посев травосмеси со стандартной и повышенной нормой высева (60 и 120 г·м<sup>-2</sup>, СГ60 и СГ120, соответственно) и укладка в виде рулонного газона, предварительно выращенного на 1 см слое вермикулита Ковдорского месторождения, вспученного в электрической модульно-спусковой печи в КНЦ РАН. Дополнительно, три конструкции в варианте ТП были засеяны злаковым газоном с добавлением клевера в соотношении 1:1 (норма высева – 60 г·м<sup>-2</sup>). Мониторинг почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>, температуры и влажности почвенных конструкций (слой 0-10 см) в течение вегетационного сезона (май-сентябрь) 2021 г. проводили с периодичностью один раз в две недели; за это время было произведено четыре укоса газонных трав с последующим измерением их биомассы.

Динамика эмиссии CO<sub>2</sub> за период измерения значительно не различалась среди вариантов почвенных конструкций. При этом ее суммарная величина за весь период измерений определялась сочетанием типа почвенной конструкции и технологией озеленения. Так, наибольшая суммарная эмиссия CO<sub>2</sub> за изученный период выявлена для ТП/СГ120, которая составила 279 г С м<sup>-2</sup> при сравнительно невысокой продуктивности газона (170 г м<sup>-2</sup>). По результатам наблюдений для всех типов почвенных конструкций рулонный газон отличался наименьшей скоростью прироста биомассы и ее суммарной величиной за весь период наблюдений (76-129 г м<sup>-2</sup>).

Предварительные результаты мониторинга указывают, что наиболее оптимальным вариантом с точки зрения углеродного баланса является газонная конструкция ТПГ/СГ60, которая отличалась высокой продуктивностью газона (297 г м<sup>-2</sup>) при относительно низком суммарном потоке CO<sub>2</sub> (239 г С м<sup>-2</sup>).



## Агрогенные и постагрогенные почвы Ямало-Ненецкого автономного округа: морфология и параметры плодородия

*Низамутдинов Т.И.<sup>1</sup>, Моргун Е.Н.<sup>2</sup>, Печкин А.С.<sup>2</sup>, Абакумов Е.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

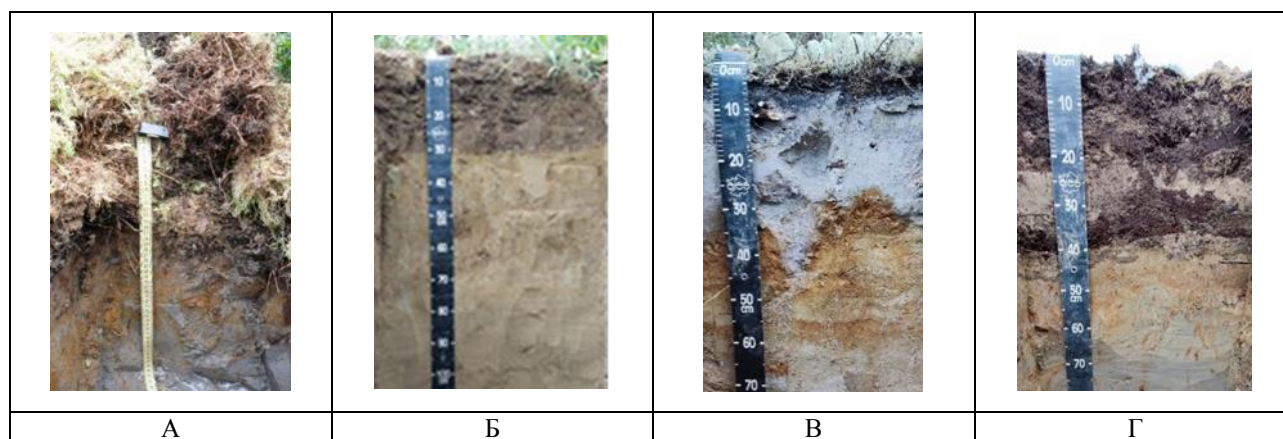
<sup>2</sup>*Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия*

*e-mail: t.nizamutdinov@spbu.ru*

Агроедогенез признан шестым, антропогенно инициированным, фактором почвообразования, в процессе которого происходят коренные (чаще всего негативные) изменения свойств природных почв [Kuzyakov and Zamanian, 2019]. Начавшееся в 1930-х годах XX века активное сельскохозяйственное освоение криогенных экосистем привело к коренной трансформации зональных почв Севера. В настоящее время известно, что при вовлечении почв криолитозоны в сельскохозяйственный оборот происходит снижение глубины залегания верхней кровли многолетнемерзлых пород, нарушаются естественные водные и температурные режимы почв, изменяется почвенная структура и микробиологическое разнообразие.

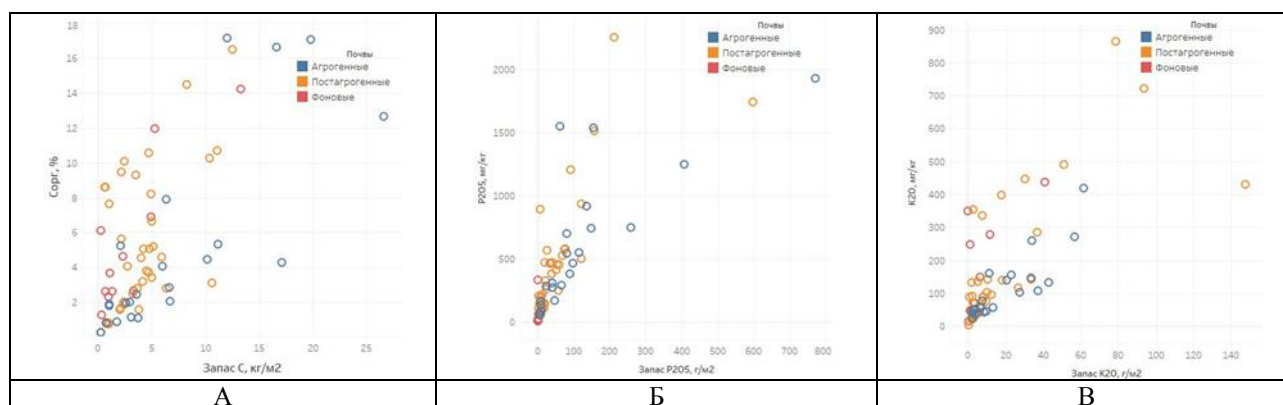
В Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) развитие научно обоснованного сельского хозяйства берет начало от момента открытия Ямальской опытной агростанции в 1932 г. До кризиса 90-х годов сельское хозяйство открытого и закрытого грунта развивалось интенсивно, в результате чего в регионе сформировалось множество агроэкосистем. Сейчас эти почвы, в большинстве случаев, находятся в состоянии залежей, но существуют отдельные участки где сельское хозяйство ведется и в настоящее время.

Были проведены исследования агрогенных и постагрогенных почв ЯНАО в Приуральском, Ямальском, Шурышкарском, Надымском и Красноселькупском районах. Изучались почвы полей, частных огородов и теплиц – всего за 4 года исследований было заложено 42 почвенных разреза. Было установлено, что в результате агропромышленного освоения целинные почвы ЯНАО подверглись коренной трансформации. Морфологическое строение агроземов кардинально отличается от фоновых почв (рис. 1). В ходе обильного внесения органических удобрений были сформированы мощные пахотные (дерновые) горизонты мощностью до 20-30 см (в отдельных случаях до 40 см). Эти горизонты имеют комковатую или мелкокомковатую структуру, они рыхлые (плотность сложения редко превышает 1 гр/см<sup>3</sup>). В отдельных случаях наблюдаются начавшиеся процессы вторичного оподзоливания (это касается наиболее старых залежей на легких песчаных и супесчаных почвообразующих породах в Надымском р-не ЯНАО). Повсеместно в профилях залежных и действующих агроземов отмечаются признаки криогенных процессов (пятна оглеения, признаки криогенной турбации, морозобойные клинья). Агрогенные и постагрогенные почвы ЯНАО отличаются от зональных почв региона также по химическим свойствам и параметрам плодородия. Эти почвы преимущественно слабокислые (рН Н<sub>2</sub>О 5-6), агрогенные и постагрогенные отличаются высоким содержанием органического углерода в органоминеральных горизонтах (С<sub>орг</sub> 8-10%). Также агрогенные и постагрогенные почвы отличаются от зональных почв ЯНАО повышенным содержанием элементов питания.



**Рис. 1.** Строение почвенных профилей в Приуральском и Надымском р-нах ЯНАО (А, В – зональные почвы, Б, Г – агрогенные и постагрогенные почвы)

За счет сформированного мощного плодородного пахотного горизонта в агрогенных и постагрогенных почвах ЯНАО сформировались существенные запасы органического углерода, фосфора и калия (рис. 2). Даже при низких массовых концентрациях элементов их объемные концентрации (запасы) могут быть велики.



**Рис. 2.** Диаграммы рассеяния концентрации элементов к их запасам в органоминеральных горизонтах почв ЯНАО (А – содержание  $C_{орг}$ , %, Б –  $P-P_2O_5$ , мг/кг, В –  $K-K_2O$ , мг/кг)

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что агрогенные и постагрогенные почвы Ямало-Ненецкого автономного округа являются результатом агропедогенеза в криогенных условиях. Следует подчеркнуть, что если для черноземной зоны (и зон не рискованного земледелия) агрогенная трансформация почв понимается больше как негативный процесс, то в высоких широтах, где земледелие имеет преимущественно очаговый характер распространения, в процессе агропедогенеза были сформированы эдафотопы отличающиеся высокими параметрами плодородия, повышенным содержанием органического углерода и т.д. Эти почвы, в особенности залежные, следует оценивать, как ресурс, который в будущем использовать для повторного вовлечения в сельское хозяйство, что позволит минимизировать антропогенное воздействие на целинные земли Ямало-Ненецкого автономного округа.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Исследование проводилось при поддержке НЦМУ «Агротехнологии будущего» договор № 075-15-2022-322 от 22.04.2022.

*Kuzyakov, Y. and Zamanian, K. Reviews and syntheses: Agropedogenesis – humankind as the sixth soil-forming factor and attractors of agricultural soil degradation, Biogeosciences, 16, 4783–4803, <https://doi.org/10.5194/bg-16-4783-2019>, 2019.*

## Морфологическая организация почв населенных пунктов севера Западной Сибири

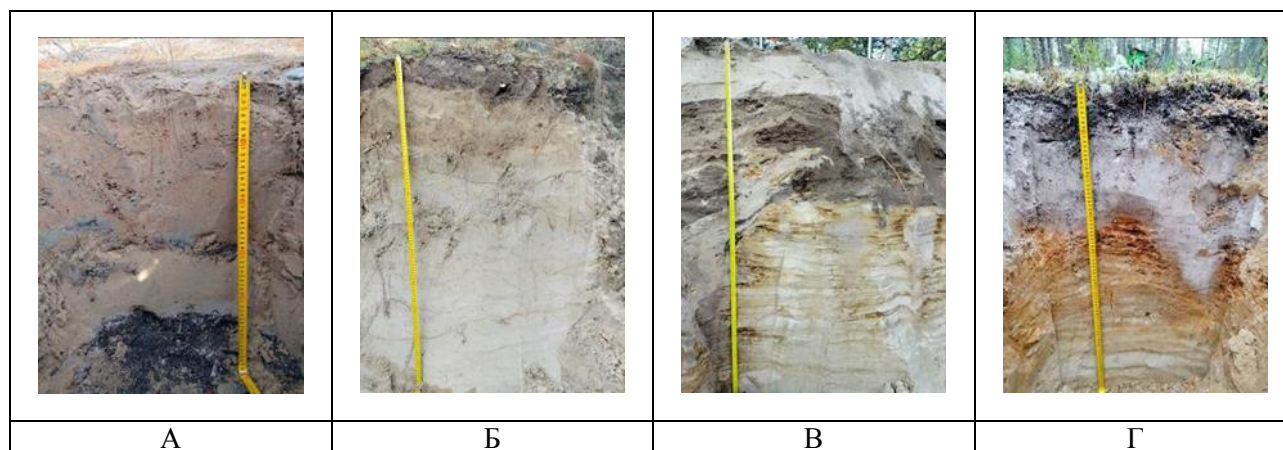
*Печкин А.С.<sup>1</sup>, Шинкарук Е.В.<sup>1</sup>, Красненко А.С.<sup>1</sup>, Моргун Е.Н.<sup>1</sup>,  
Абакумов Е.В.<sup>2</sup>, Низамутдинов Т.И.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: a.pchkin.ncia@yandex.ru

Почвенный покров урбанизированных территорий, благодаря своим буферным свойствам, играет существенную роль в функционировании антропогенно-нарушенных экосистем. Городские почвы постоянно подвергаются техногенному воздействию, что приводит к изменению структуры и экологических связей в системе «почва-растение». Антропогенез является ведущим фактором почвообразования в урбанизированных экосистемах, результирующим фактором которого является формирование специфических почвенных разностей в городских экосистемах.

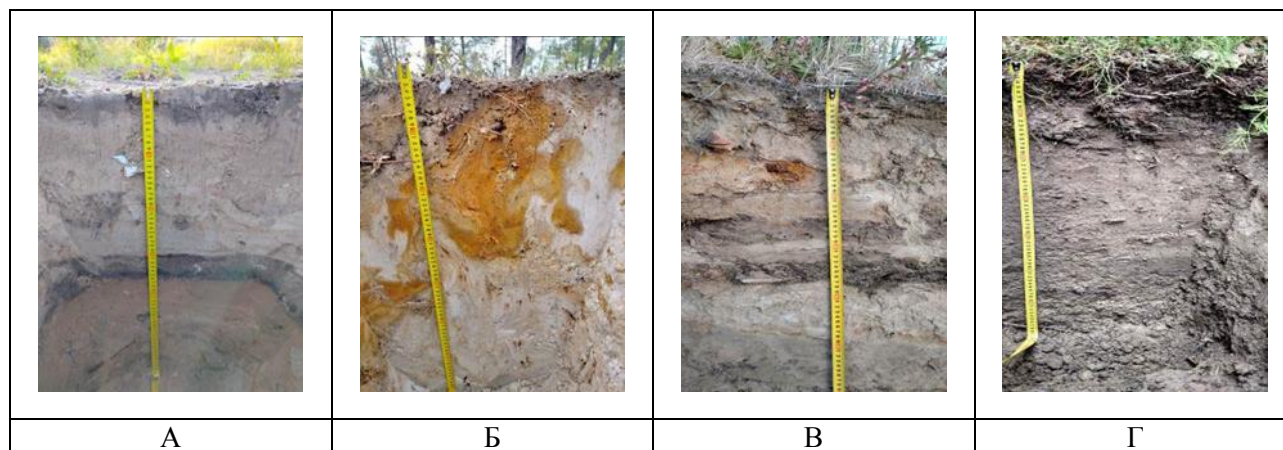
Территория Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) входит в состав Арктической зоны РФ и охватывает крайний север Западной Сибири, включающий восточный склон Полярного Урала, Нижнее Приобье, полуостров Ямал, Тазовский и часть Гыданского полуострова; районы Тазовской и Обской губы с бассейнами рек Надым, Пур и Таз. На территории округа в настоящее время числится 74 населенных пункта, 8 из них имеют статус города. Самым старым действующим населенным пунктом является г. Салехард (1595 г.), самыми молодыми являются п. Ягельный (1986 г.) и г. Губкинский (1986 г.). Были проведены исследования почв населенных пунктов в Шурышкарском, Приуральском, Надымском и Пуровском районах. Изучались почвы антропогенно-измененные и ненарушенные (фоновые) в таежной и лесотундровой природных зонах – всего в 2022 г. было заложено 39 почвенных разреза. Было установлено, что в результате промышленного освоения региона (с 1950 по 1990 гг.) почвы населенных пунктов ЯНАО подверглись коренной трансформации. Морфологическое строение почв урбанизированных территорий кардинально отличается от зональных почв округа (рис. 1).



**Рис. 1.** Строение почвенных профилей в Приуральском (с. Аксарка) и Надымском (г. Надым) р-нах, где А – технозем оглеенный, Б – подбур иллювиально-железистый, В – урбанозем псевдофибровый, Г – подзол иллювиально-железистый оруденелый.

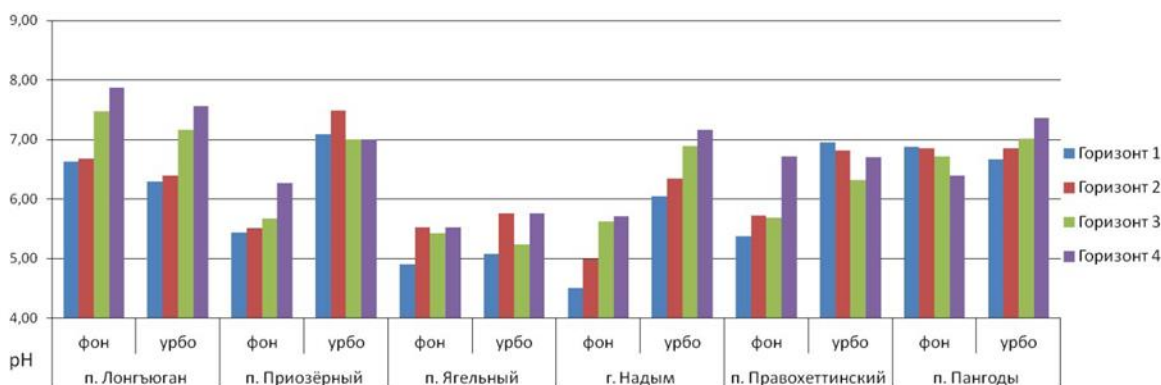
В ходе строительства городов и поселков были сформированы урбистратифицированные горизонты мощностью до 20-30 см (в отдельных случаях до 40 см). Они включают в себя останки твердых бытовых отходов, строительный мусор, следы горения и перегнившие органические останки. В отдельных случаях наблюдаются признаки

процессов оглеения в иллювиальных горизонтах. В профилях урбанозёмов, в отличие от зональных почв, редко обнаруживаются признаки криогенных процессов (рис. 2).



**Рис. 2.** Строение почвенных профилей в Пуровском (г. Муравленко) и Шурышкарском (с. Горки) р-нах, где А – урбанозем стратифицированный, Б – подзол иллювиально-железистый криотурбированный, В – урбостратозем, Г – криозем грубогумусовый глееватый

В большинстве случаев урбанизированные почвы ЯНАО отличаются от зональных почв региона по водородному показателю ( $pH\ H_2O$ ), но все относятся к слабокислым и нейтральным (рис. 3).



**Рис. 3.** Водородный показатель почвенных горизонтов фоновых территорий и урбанизированных систем

В результате наблюдений, можно отметить, что урбанизированные почвы Ямало-Ненецкого автономного округа являются слабоизученными и требуют проведения почвенно-экологических, почвенно-химических и почвенно-таксономических исследований в связи с широтной протяженностью региона. На сегодняшний день данных об состоянии почвенного покрова населенных пунктов региона недостаточно, необходимо проведение дальнейших исследований, которые позволят разьяснить вопросы формирования почвенного покрова городских территорий Арктической и Субарктической зоны ЯНАО, выявить особенности миграции тяжелых металлов в условиях криолитозоны, а также использовать данные исследований для экологического мониторинга и оценки степени техногенного воздействия на почвенный покров.

ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки. Москва: Стандартинформ, 2011, 8 с.

## Биологические свойства мерзлотных и сезонно промерзающих почв Центрального Кавказа в условиях агровоздействия

*Темботов Р.Х.<sup>1,2</sup>, Абакумов Е.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН, Нальчик, Россия*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: tembotov.rustam@mail.ru*

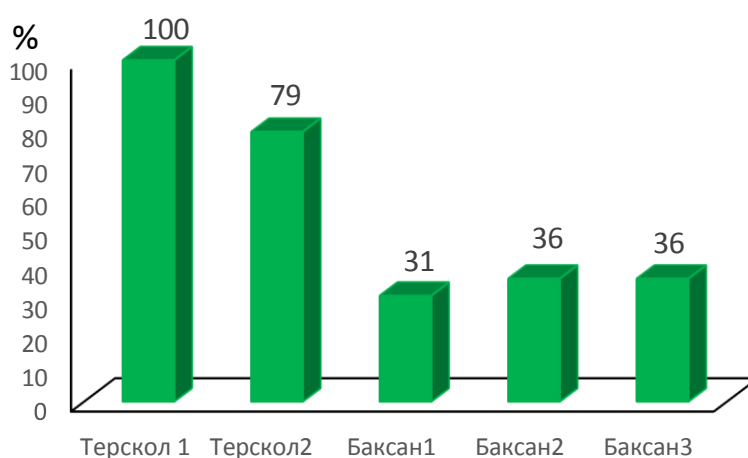
Одним из объективных показателей биологической активности почв, отражающей интенсивность и направленность протекающих в ней биохимических процессов, является ферментативная активность [Казеев и др, 2003]. При оценке биологического состояния почвенного покрова оказался эффективным подход, предусматривающий комплексное определение активности почвенных ферментов двух классов: гидролаз и оксидоредуктаз, которые отражают различные аспекты биологических свойств почвы (генетические, микробиологические, биохимические), а их совокупность позволяет установить общий уровень биологической активности [Горобцова и др., 2018]. Исходя из вышесказанного, целью данной работы стала оценка ферментативной и общей биологической активности приледниковых почв Центрального Кавказа в пределах ущелий Баксан и Терскол (Кабардино-Балкарской республики).

Изученные приледниковые почвы (криоземы, литоземы) ущелий Баксан и Терскол, проявляют различную активность ферментов (табл. 1). Анализ полученных данных об уровнях инвертазной активности показал, что данный фермент в почвах на участках ущелья Терскол, характеризуется в поверхностном горизонте высокой активностью. В почвах Баксанского ущелья, активность ниже – средняя и слабая. Вниз по профилю всех изученных почв активность инвертазы снижается, за исключением разреза на участке Терскол2, где наблюдается небольшое увеличение в гумусовом горизонте по сравнению с подстилочным. По активности другого гидролитического фермента – фосфатазы, выявлена высокая и очень высокая активность в поверхностном слое почв ущелья Терскол. Активность фосфатазы в поверхностном слое почв Баксанского ущелья значительно ниже и наблюдается также, как и по инвертазе только слабая и средняя. Вниз по профилю, в изученных почвах как Баксанского, так и Терскольского ущелья, активность фосфатазы падает во всех почвах, за исключением почвы Терскол2. В отличие от гидролитических ферментов, окислительно-восстановительный фермент – каталаза, проявляет большую активность в почвах Баксанского ущелья. Отличие активности каталазы от гидролитических ферментов, также заключается в повышении уровня активности вниз по профилю, всех изученных почв.

Почвенный разрез	Горизонт	Инвертаза, мг глюкозы/(1 г/24 ч)	Фосфатаза, мг P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /100г/ч	Каталаза, мл O <sub>2</sub> /(1 г/1 мин)
Терскол1	AU	57,31	67,57	1,6
	AUm	0,26	5,32	0,2
	AC	0	3,29	2,4
Терскол2	H	74,91	51,42	1,1
	AU	82,65	53,84	0,3
	AC	0	11,49	1,6
Баксан1	AU	19,13	18,99	0,8
	AU2	4,68	9,69	3,9
	AU3	0	8,81	1,7
	BC	0	9,98	1,2
Баксан2	AU1	18,28	12,30	1,5
	AU2	15,65	6,20	5,4
	AC	0	3,29	5,9
Баксан3	AU1	5,7	12,45	1,9
	AU2	0,43	12,44	2,0

**Табл. 1.** Ферментативная активность изученных приледниковых почв.

Для сравнения общей биологической активности, рассчитана суммарная относительная ферментативная активность изученных приледниковых почв верхних (0-10 см) горизонтов (рис. 1). Наибольшая суммарная ферментативная активность выявлена на участке Терскол1 (100 %), которая находится в самой верхней части ущелья Терскол. Наибольшая биологическая активность почвы на данном участке вероятно связано с тем, что почва на этом участке менее нарушена, так как труднодоступна и мало пригодна для использования в сельском хозяйстве. Наименьшая общая биологическая активность наблюдается на участке Баксан1 (31%), который больше всего подвержен агрогенному воздействию, так как находится под пашней. Это утверждение согласуется с выводами, сделанными в работе [Хакунова и др., 2018], в которой было показано, что пахотное воздействие негативно сказывается на биологических свойствах почв, в том числе и на ферментативную активность. Полученные данные о различной энзиматической активности почв приледниковой зоны и пахотных почв ущелий свидетельствуют о том, что нужно более глубокое изучение микробиома этих почв, в частности, олиготрофной и копиотрофной составляющих микробиома.



**Рис. 1.** Общая суммарная ферментативная активность (%) изученных почв верхних (0-10 см) горизонтов.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке НЦМУ «Агротехнологии будущего», проект № 075-15-2022-322.

*Горобцова О.Н., Минкина Т.М., Улигова Т.С., Темботов Р.Х., Хакунова Е.М.* Биологическая активность горных и равнинных чернозёмов Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии) // Поволжский экологический журнал. 2018. № 2. С. 183 – 196.

*Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф.* Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. Ростов н/Д: Изд-во Ростов. гос. ун-та, 2003. 350 с.

*Хакунова Е.М., Горобцова О.Н., Гедгафова Ф.В., Улигова Т.С., Темботов Р.Х.* Изменение биологической активности горных чернозёмов Центрального Кавказа при сельскохозяйственном использовании (в границах эльбрусского варианта поясности Кабардино-Балкарии) // Агрехимия. 2018. № 3. С. 12-18.

## СЕКЦИЯ 8. ИССЛЕДОВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ И ПАЛЕОБИОТЫ КРИОГЕННЫХ ПОЧВ

### Мезофауна палеопочв Янского плоскогорья

*Боескоров В.С., Саввинов Г.Н., Михайлов К.Н.*

*НИИ прикладной экологии Севера Северо-Восточного федерального университета*

*им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия*

*e-mail: vstepb@mail.ru*

На долю беспозвоночных приходится более 90% видов животного царства. Их палеонтологическая летопись начинается более 650 млн. лет назад. К ним относится более 32 современных типов, т. е. крупных таксономических групп, и представители почти всех их сохранились в ископаемой форме. Нами приведен только краткий обзор некоторых доминантных ископаемых беспозвоночных палеопочв Янского плоскогорья. Несмотря на их, относительно малые размеры и хрупкость, нами обнаружены в мерзлых грунтах двух палеонтологических местонахождений: Батагайской термоденудационной котловины и берегового обрыва «Улахан Сулар» (рис. 1).

В наших исследованиях мезофауна этих участков представлена лишь отдельными фрагментами хитиновых покрытий. Ископаемых насекомых в основном обнаружили там, где имеются залежи погребенного органического горизонта и на мелкозернистых осадочных породах – многолетнемерзлых породах, представленных едомными отложениями. Обнаруженные нами останки ископаемых насекомых найдены на глубинах от 8 до 44,5 м. Всего найдено четыре тафоценозов, в которых собрано 223 фрагментов насекомых. Такие находки, как позднеплейстоценовые насекомые дают нам наиболее прямые сведения не только о природно-климатических и ландшафтно-географических условиях, но и почвенно-растительном покрове, преобладавшем в тот или иной исторический период.



**Рис.1.** Фрагменты насекомых из местонахождений Батагайской термоденудационной котловины и берегового обрыва «Улахан Сулар»

Извлеченные нами из мерзлых толщ ископаемые насекомые в основном принадлежат трем семействам жуков долгоносиков (Curculionidae), пилюльчиков (Byrrhidae) и жужелиц (Carabidae). Эти представители насекомых типичны для тундростепных комплексов, живут в основном на сухих лугово-подобных пятнах с богатой растительностью и в лесных районах вблизи опушки леса. Наиболее разнообразный видовой состав палеоэнтомокомплексов установлен на Батагайской термоденудационной котловине (48 фрагментов хитиновых покрытий). По числу фрагментов и количеству видов преобладают долгоносики и жужелицы. Обнаруженные позднеплейстоценовые энтомокомплексы Янского плоскогорья близки к современным энтомофаунам данного исследованного района, так как подавляющее большинство видов сохранилось в современной фауне. Экологическая близость обнаруженных нами ископаемых насекомых указывает на то, что в позднеплейстоценовых средах преобладают сухая тундра и степная тундра, так как жук-пилюльчик *Morychus viridis* является чисто тундростепным индикатором.

Таким образом, в изученных энтомокомплексах преобладают виды степного комплекса. Луговой комплекс представлен в меньшей мере. Для выявленных позднеплейстоценовых энтомофаун характерно также присутствие тундрового комплекса. Лесные виды представлены единично.



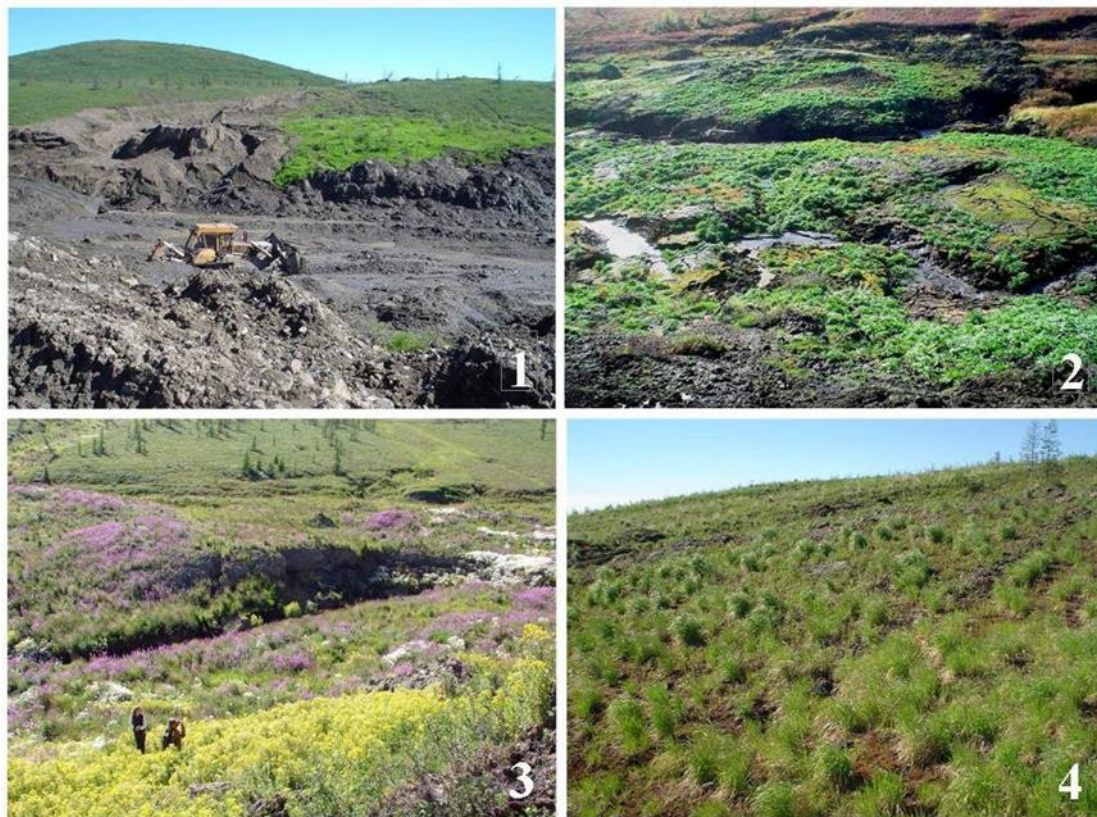
## Восстановление растительности на нарушенных отложениях ледового комплекса

*Давыдов С.П., Давыдова А.И.*

*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,  
Северо-Восточная научно-экспериментальная станция, Черский, Россия  
e-mail: davydoffs@mail.ru*

Нами проведены многолетние исследования восстановления растительности на нарушенных многолетнемёрзлых льдистых лессовидных отложениях ледового комплекса (ЛК или едомной свиты) плейстоценового возраста, выполняющих долины трех низкопорядковых предгорных золотоносных ручьев (68° 35-45" сш) на северо-востоке Колымской низменности (фото 1). До антропогенного нарушения почвогрунтов долин материнская растительность была представлена предгорной мохово-лишайниковой кустарничковой лесотундрой и участками редкостойной лиственничной тайги с широко развитым кустарниково-кустарничковым ярусом растительности. Ежегодные наблюдения рыхлых оттаивающих, талых и затем промерзающих пород вскрышного массива позволили детально изучить динамику сукцессии и видовой состав растительности. Ниже мы приводим описание этих процессов с шагом в 1-2 года.

В год нарушения и первый сезон после оттаивания, дегидратации и усадки перемещённых льдистых грунтов ЛК, льдистость которых достигала 30-40%, начинается зарастание поверхности пионерными видами мхов обычно с преобладанием *Funaria hydrometrica* и иногда с единичными побегами крестовника (пепельника) болотного *Tephroseris palustris*. На второй год крестовник уже широко представлен (фото 2), появляется арктополевица широколистная *Arctagrostis latifolia* и единичные всходы трёхрёберника (ромашки) Гукера *Tripleurospermum hookeri*, хохлатки сибирской *Corydalis sibirica*, которые являются обычными пионерными видами в регионе. На более увлажнённых участках отвалов отмечается жерушник болотный *Rorippa palustris*, а на сухих – дескурация софиевидная *Descurainia sophioides*. Кое-где появляются редкие всходы ив. На третий год растёт обилие трёхрёберника и арктополевицы, появляются многочисленные всходы иван-чая узколистного *Chamaenerion angustifolium* и вейника пурпурного *Calamagrostis purpurea*. На четвёртый год продолжается экспансия и совместное доминирование в травостоях иван-чая, крестовника, трёхрёберника (ромашки) Гукера и, реже, вейника, арктополевицы и, иногда, пырейника якутского *Elymus jacutensis*. В нижнем ярусе отмечается хвощ полевой *Equisetum arvense*. Виды мхов-пионеров почти исчезают. Эти виды разнотравья часто формируют луга, особенно на увлажнённых почвогрунтах нарушенных склонов приисковых долин. Они характеризуются исключительно обильным травостоем и растительностью, достигающей 1,7 м высоты, с проективным покрытием до 90-95% (фото 3). Также почти чистые луга, но с доминированием злаков - вейника пурпурного и арктополевицы, возникают на более сухих отвалах (фото 3). Эти луговые ценозы, сформированные на 4-5 год и характеризующие травянистую стадию развития сукцессий, часто квазиустойчивы и могут существовать несколько лет в фитоценозах долин, почти не меняясь. Единичные побеги ив, среди которых доминируют ива красивая *Salix pulchra* и ива аляскинская *S. alaxensis*, появляются на увлажнённых участках в рывинах и оврагах едомных отвалов уже на 2-3 год. Ольховник *Duschekia fruticosa* заселяется много позже в ложбинах стока и не имеет такого распространения, как многочисленные виды ив. Большая часть нарушенной территории через 6-7 лет покрывается лугами с участием вейника пурпурного, пырейников якутского и ленского, арктополевицы, иван-чая, хвоща полевого, трёхрёберника Гукера, ячменя гривастого *Hordeum jubatum*, и редкой пижмы северной *Tanacetum boreale*. Обилие кустарников постепенно возрастает, и на 7-8 годы они начинают подавлять развитие разнотравья, из которого первыми выпадают такие рудеральные виды, как крестовник, хохлатка, дескурация и жерушник.



**Фото:** 1). Вскрышные работы на одном из ручьёв; 2). 2 год после нарушения; 3). Разнотравный луг, 4-5 годы; 4). Вейниковый луг, 4-5 годы.

Появление кустарниковой березки (обычно *Betula divaricata*), карликовых кустарничков, – брусники *Vaccinium vitis-idaea*, голубики *V. uliginosum*, а позже багульника стелющегося *Ledum decumbens*, - и одиночных побегов лиственницы *Larix cajanderi* происходит через 8 - 9 лет. Травяная стадия сукцессии в основном, завершается. И далее на нарушенных и вновь промёрзших почвогрунтах постепенно формируется мозаика фитоценозов субклимаксных стадий. Протаивание мёрзлых отложений ЛК повсеместно сопровождается минерализацией захороненного органического материала с высокой эмиссией парниковых газов, чему посвящено большое количество научных исследований. Однако бурный рост рудералов в ходе сукцессии за счет высвобождения биофильных элементов из отложений ЛК значительно сокращает эмиссию CO<sub>2</sub> уже со второго вегетационного сезона после антропогенного нарушения. После второго – третьего сезонов пики эмиссии углерода в атмосферу смещаются на осенне-зимний и ранневесенний периоды.

Трудно утверждать однозначно, но возможно, что в сукцессии растительности участвуют виды, поступающие из пула ископаемых семян, захоронённых в мёрзлых толщах ЛК.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена в рамках госзадания ТИГ ДВО РАН №122020900184-5.

## Почвенные зооценозы горно-тундровых ландшафтов Полярного Урала

Дуты А.А.

Институт биологии, ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

e-mail: kolesnikova@ib.komisc.ru

Беспозвоночные в горно-тундровых почвах сосредоточены в поверхностном 5-сантиметровом слое, в оголенных местах пятнистого грунта – всего в 2-сантиметровом слое, практически не распространяются за его пределы в минеральные горизонты, тем не менее, выполняют роль агентов биологического круговорота, существенно ускоряя переход из растительного опада в почву таких элементов, как калий, кальций, магний, натрий [Гиляров, Криволуцкий, 1985].

Исследования почвенной фауны на Полярном Урале начались в начале XX века. По результатам комплексной экспедиции О. Баклунда, маршрут следования отряда проходил от Нижней Оби, от протоки Выл-Посл (сейчас г. Лабытнанги) на восток до р. Хадытаяхяха, затем вверх по р. Щучья в горы Полярного Урала, были опубликованы первые списки беспозвоночных этого района. В ходе дальнейших исследований было выявлено, что на западных склонах Полярного Урала обитает около 150 видов крупных беспозвоночных, жизненный цикл которых полностью или частично проходит в мерзлотных почвах [Биоразнообразие..., 2007]. В настоящее время актуальной представляется характеристика не только таксономического состава, но и структурно-функциональной организации сообществ беспозвоночных, населяющих горно- тундровые почвы Полярного Урала.

Цель данной работы – охарактеризовать состав, численность и структуру почвенных зооценозов кустарничково-лишайниковой (КЛТ) и кустарничково-мохово-лишайниковой (КМЛТ) тундр, расположенных на склонах, а также листовничного редколесья (ЛР) – у подножья г. Поуркеу (южная часть Полярного Урала, его крайний северо-восток, ЯНАО, водораздел р. Собь (бассейн р. Обь) и ее правого притока р. Восточный Нырдумэншор).

Для оценки разнообразия почвенных беспозвоночных на каждом из трех участков отбирали 25 почвенных образцов, размером 10×10×8 см, по регулярной сетке, пять рядов по пять проб в каждом ряду, с шагом 5 м, итого 100 проб. Рассчитывали среднее значение численности беспозвоночных на участок и стандартную ошибку ( $N \pm SE$ ), вычисляли среднее значение относительной влажности ( $W$ , %) и температуры ( $C^\circ$ ) подстилки на каждом участке. Степень агрегированности особей оценивали при помощи индекса Кейси по формуле:  $I_c = (S^2 - M)/M^2$ , где  $M$  – средняя численность данной группы,  $S^2$  – дисперсия. Связь пространственного распределения почвенных беспозвоночных с влажностью почвы оценивали с помощью коэффициента корреляции Спирмена ( $r$ ).

Относительная влажность подстилки в рассмотренных растительных сообществах составила от 35,91% до 44,6%. Температура подстилки на участке КМЛТ была почти в два раза ниже, чем на участках КЛТ и ЛР (табл. 1). Распределение этих параметров в пространстве на исследуемых участках имело случайный характер, так как значения индекса Кейси ( $I_c$ ) близки к 0.

В почвенных зооценозах участков КЛТ и КМЛТ отмечено по пять таксонов, по обилию доминировали личинки Diptera. В листовничнике (ЛР) таксономическое разнообразие почвенной фауны было выше (восемь таксонов), но двукрылые численно преобладали. На участке КЛТ общая численность почвенных беспозвоночных в два раза ниже, чем на участках КМЛТ и ЛР. Аналогичные изменения численности были зарегистрированы для функциональных групп зоофагов и сапрофагов. Фитофаги не были зарегистрированы на участке КМЛТ, и их доля была незначительна относительно зоофагов и сапрофагов на двух других участках (табл. 1)

Параметр	КЛТ	КМЛТ	ЛР
Влажность подстилки, %	35,1±2,28	43,3±2,21	44,6±2,25
Температура подстилки, °С	15,5±0,58	8,8±0,19	15,7±0,37
Численность, экз./м <sup>2</sup>			
зоофаги	1,9±1,08	5,1±1,82	5,1±2,44
сапрофаги	5,1±2,05	12,8±6,59	10,2±4,20
фитофаги	1,3±1,30	0±0	0,7±0,65
общая	8,3±2,33	17,9±6,62	16,0±5,25
Индекс Кейси (Ic)			
влажность подстилки	0,19±0,094	0,05±0,008	0,06±0,012
температура подстилки	-0,03±0,001	-0,11±0,002	-0,05±0,001
общая численность	0,14±0,041	1,59±0,389	0,41±0,168

**Табл. 1.** Исследуемые параметры в кустарничково-лишайниковой (КЛТ), кустарничково-мохово-лишайниковой (КМЛТ) тундрах, лиственничнике (ЛР)

Пространственное распределение почвенных беспозвоночных было неравномерным на всех трех участках, причем более агрегированным оно оказалось в кустарничково-мохово-лишайниковой тундре (табл. 1). Ранее были получены данные как о случайном распределении почвенных беспозвоночных в зональных восточно-европейских тундрах, так и о высокой агрегированности таксономических и трофических групп беспозвоночных в крупно- и мелкоерниковой тундрах [Таскаева и др., 2021]. Расчет коэффициента  $r$  показал отсутствие связи (либо слабую связь, либо недостоверные значения) численности беспозвоночных с распределением влажности и температуры подстилки на всех участках. Возможно, случайное либо агрегированное распределение беспозвоночных в горно-тундровых почвах участков КЛТ, КМЛТ и ЛР определяется характеристиками напочвенного покрова.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Автор благодарен А.А. Колесникову, Т.И. Колесниковой (Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского) за помощь в отборе проб.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР отдела экологии животных «Разнообразие фауны и пространственно-экологическая структура животного населения европейского северо-востока России и сопредельных территорий в условиях изменения окружающей среды и хозяйственного освоения», рег. № 122040600025-2.

Биоразнообразие экосистем Полярного Урала / отв. редактор М. В. Гецен. Сыктывкар, 2007. 252 с.

Гиляров М.С., Криволуцкий Д.А. Жизнь в почве. Москва: Молодая гвардия, 1985. 191 с.

Таскаева А.А., Конакова Т.Н., Колесникова А.А., Кудрин А.А., Панюков А.Н., Лаптева Е.М. Пространственное распределение беспозвоночных животных в почвах юго-восточной части Большеземельской тундры // Известия РАН. Серия биологическая. 2021. № 1. С. 103–112.



симметричных форм, характерных для злаков, произрастающих в переувлажненных ценозах и многоугольных форм, типичных для осок. Напротив, содержание пыльцы сем. *Surgetaceae* в спектрах из поверхностных проб не превышает 5%, при этом значительные площади Халлерчинской тундры покрыты влагалищнопушицевыми болотами. В спектрах проб из нижних горизонтов почв количество пыльцы осоковых обычно не больше 10%. Таким образом, наличие характерных форм является доказательством присутствия этого семейства в составе растительности.

По степени участия в современном растительном покрове ключевых участков злаковые уступают осоковым, однако, их пыльца в спектрах проб из верхних горизонтов профилей преобладает. Злаковые производят много пыльцы обладающей хорошей транспортабельностью, соответственно она может быть определена в спектрах даже при отсутствии этих растений в точке отбора либо ее содержание является завышенным. Таким образом, обнаруженные фитолиты осок и некоторых злаков являются надежным гарантом их представителей в составе растительности. Следует подчеркнуть, что фитолитный анализ позволяет выделять и другие формы, характерные для видов – гигрофитов.

Фитолитный анализ имеет ограничения при изучении участия древесной и кустарниковой растительности в фитоценозах. Фитолитные профили почв под ключевыми участками лиственничного редколесья не отражают участие некоторых групп растительных ассоциаций (кустарнички, лиственница). В тканях этих растений формируется незначительно количество фитолитов с четкими морфологическими признаками, к тому же они неустойчивы к разрушению. Значительную роль в фитолитных спектрах играют удлиненные гладкие формы, характерные для двудольных трав. В большинстве ценозов процент их содержания довольно высок, при малой индикационной значимости. Но на исследуемом материале они подтверждает широкое участие в составе растительности разнотравья, пыльца которого в спектрах не всегда отличается разнообразием и обычно представлена единично. Важными для диагностики являются округлые формы мхов. Моховой покров развит на исследуемой территории, но при этом содержание спор в спектрах сравнительно невелико, вероятно, в силу перехода этих растений на вегетативное размножение. В фитолитных спектрах не представлены отмеченные в составе растительности *Betula sect. Nanae*, *Alnus* и *Salix*. Эти кустарники фиксируются только палинологическим методом с учетом того, что содержание карликовой березки и ольхи может быть завышенным, а ивы заниженным. Важными находками являются формы, характерные для древесины *Larix*, пыльца которой плохо сохраняется. Кубические фитолиты хвойных не обнаружены, а значит, пыльца сосен имеет заносное происхождение.

Определения таксонов до уровня семейства или рода при фитолитном методе не всегда возможно, но он позволяет выделять комплексы, характеризующие определенный фитоценоз и составить представление о растительном покрове – важнейшем факторе почвообразования. Этот метод позволяет скорректировать данные об условиях увлажнения. Горизонтальная миграционная способность фитолитов ниже, поскольку растительный опад более локализован по сравнению со спорами и пыльцой. Таким образом, фитолиты могут использоваться для характеристики локальной растительности и подтверждения участия тех или иных таксонов в ее составе, зафиксированных палинологическим методом, который дает представление в основном о зональной растительности и смене теплообеспеченности изучаемой территории.

**Воздействие пирогенной трансформации на микробиом почв лесотундры**

*Клюка Г.Г.<sup>1</sup>, Васильченко. А.В.<sup>1</sup>, Филимоненко Е.А.<sup>1</sup>, Соромотин А.В.<sup>1</sup>, Кузяков Я.В.<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия*

*<sup>2</sup>Университет Геттингена, Геттинген, Германия*

*e-mail: gleb.klyuka@bk.ru*

Пожары в тундре являются распространенным явлением. Последствия пирогенного воздействия на растительный и почвенный покровы определяется интенсивностью и продолжительностью природного пожара. Пожары низкой интенсивности (с температурой до 200°C) приводят к росту концентрации лабильного углерода в почве за счет деполимеризации ее органических компонентов и образованию пирогенных продуктов в результате недоокисления обрывков органических полимеров и мономеров [Czimczik et al., 2001] При этом пожары высокой интенсивности (с температурой от 400°C и выше) приводят к существенным потерям лабильного углерода и практически полной гибели микроорганизмов. Дефицит доступного углерода даже на фоне значительного увеличения доступности минеральных веществ из образовавшейся при пожарах золы [Kuzyakov et al., 2018] не способствует росту микробной биомассы в пирогенной почве.

В природно-климатических условиях лесотундры влияние пожаров на почвы проявляется в постпирогенном повышении температуры и снижении влажности почв, повышении рН, кратковременном увеличении доступности зольных минеральных веществ и рН, изменении доступности органических вещества для микроорганизмов. Перечисленные эффекты снижают биоразнообразие почвенных микроорганизмов (Bret-Harte et al., 2013), влияя на биохимические циклы С, N, P и S. В целом, в зависимости от интенсивности и продолжительности природного пожара в лесотундре его эффект на микробное сообщество почвы является или стимулирующим, или угнетающим. В связи с тем, что влияние пожаров на микробные свойства почв является многофакторным и носит разнонаправленный характер, вопрос оценки микробиома постпирогенных почв лесотундры является актуальным для понимания механизмов круговорота С и N и процессов адаптации микроорганизмов к меняющимся условиям окружающей среды.

Для изучения влияния пирогенной трансформации на микробиом почв были проведены исследования на пяти участках лесотундры в Ямало-Ненецком автономном округе. На каждом участке исследования пробы почв отбирались с пирогенного трансформированного и контрольного участков в пяти полевых повторностях. Выбранные участки для исследования характеризовались различным временем, прошедшим с момента их пирогенной трансформации – 2 месяца, 2, 3, 4 и 5 лет. Аналитические исследования почв включали измерения скорости базального дыхания (BR), углерода микробной биомассы (Смик), органического углерода (Сорг), общего азота (N), колоний образующего фактора, активности ферментов, участвующих в основных метаболических реакциях, – 1,4-бета-целлобиозидазы, β-1,4-глюкозидазы, α-1,4-глюкозидазы, N-ацетил-бета-D-глюкозаминидазы, лейцинаминопептидазы, полифенолоксидазы, полифенолпероксидазы, фосфотазы. Активность ферментов определялась методом флюороген-меченых субстратов на планшетном люминометре Thermo Scientific Luminoskan Ascent. Содержания Сорг, N, активность 1,4-бета-целлобиозидазы, β-1,4-глюкозидазы, α-1,4-глюкозидазы, N-ацетил-бета-D-глюкозаминидазы, лейцинаминопептидазы, полифенолоксидазы, полифенолпероксидазы, характеризуются линейной положительной зависимостью и совместно со скоростью базального дыхания почв в течении двухлетнего периода после пирогенной трансформации почв повышаются в минеральном и снижаются в органическом горизонте по сравнению с почвами контрольных участков. Показатели колоний образующего фактора и Смик в постпироенных почвах в течение двух лет после пожаров были в 5 раз выше аналогичных показателей в контрольных почвах, что свидетельствует об изменении микробного сообщества почв под воздействием природных пожаров. Пирогенная трансформация

увеличивает количество копиотрофных бактерий, которые являются быстрорастущими и их активность увеличивается в среде, богатой питательными веществами. Напротив, количество олиготрофных бактерий снижается, так как они являются медленно растущими и адаптированными к условиям с низким содержанием питательных веществ [Mataix-Solera et al., 2009].

Выявленные показатели колоний образующего фактора и Смик являются не типичными для олиготрофных микроорганизмов тундровых почв. Сдвиг в составе микробного сообщества может иметь важные последствия для функционирования экосистемы, поскольку различные таксоны микробов играют решающую роль в круговороте питательных веществ, секвестрации С и взаимодействии растений с микроорганизмами. Описанный эффект может длиться от нескольких месяцев до нескольких лет и зависит от процессов вторичной сукцессии, которые определяют скорость восстановления подстилки и состав доминирующей флоры на постпирогенном участке. Через 3-4 года после пожара изучаемые показатели пирогенных почв принимают значения ниже соответствующих им контрольных в силу постепенного увеличения дефицита органического вещества, необходимого для поддержания активного метаболизма почвенных микроорганизмов. Изменения влажности, температуры, количества органического и минерального вещества в почве являются значимыми факторами так как напрямую влияют на количество и тип микробного сообщества. При снижении Сорг и N активность микроорганизмов постепенно снижается [Blagodatskaya et al., 2013] и почву снова начинают заселять олиготрофные микроорганизмы, с течением времени количество органического вещества увеличивается, и активность микроорганизмов возрастает. Таким образом, через 5 лет после пирогенной трансформации почвы содержания Сорг, N и активность ферментов возрастают до уровней, характерных для почв до воздействия на них пожара.

#### **Благодарность.**

Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта TerrArctic (Тюменская область Правительственный проект № 89-ДОН) и CarboRus (075-15-2021-610).

*Blagodatskaya E., Kuzyakov Y.* Active microorganisms in soil: Critical review of estimation criteria and approaches. // *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, Vol. 67, pp. 192-211. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.08.024.

*Bret-Harte M.S., Mack M.C., Shaver G.R., Huebner D.C., Johnston M., Mojica C.A., Pizano C., Reiskind J.A.* The response of Arctic vegetation and soils following an unusually severe tundra fire // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, Vol. 368, No (1624):20120490–20120490 DOI:10.1098/rstb.2012. 0490.

*Czimec C.J., Kramer C. et al.* Plant compounds and their turnover and stabilization as soil organic matter // *Global biogeochemical cycles in the climate system*. San Diego, 2001 *Kuzyakov Y., Merino A., Pereira P.* Ash and fire, char, and biochar in the environment // *Land Degrad Dev*, 2018, Vol. 29, pp. 2040–2044. DOI: 10.1002/ldr.2979.



## Микробиоморфные комплексы мерзлых почв полуострова Быковский

Ковалева Н.А.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия  
e-mail: bagiryannana@mail.ru

Почва как природно-историческое тело постоянно получает информацию о факторах, ее формирующих, и записывает природные особенности в своем профиле в виде микробиоморфных комплексов, сохраняющихся на протяжении длительного времени. Исследования проводились в зоне распространения многолетнемерзлых отложений на Севере республики Саха Якутии в трех почвах катены в районе обнажения Мамонтова Хайата п-ова Быковского, на берегу моря Лаптевых.

Исследования основаны на микроскопическом анализе комплекса биологических остатков размером менее 0,1 мм. Изучение микрофоссилий проводилось с использованием оптического микроскопа Carl Zeiss AxioLab A1, при увеличении 100, 400 с применением метода фазового контраста. Сканирующая электронная микроскопия позволила детально определить особенности формы и поверхности частиц и сделать выводы об их изменениях. Фотографии микробиоморф были сделаны в Центре Коллективного Пользования ИФХиБПП РАН (Пущино) с использованием электронного микроскопа Vega Teskan 3 LSU и режима BSE.

В работе представлен качественный и количественный состав микробиоморф из профилей современных почв – глеезема потечно-гумусового тяжелосуглинистого; глеезема криотурбированного тяжелосуглинистого и торфяно-глеезема окисленно-глеевого тяжелосуглинистого. Изученные профили организованы по типу: разрез-412-17 – АУт – Bghi – Gox@ – G1 – G2 – глеезем потечно-гумусовый тяжелосуглинистый; разрез-131-19 – АУт – Bcrn – Bg – G – Gox - G@ - глеезем криотурбированный тяжелосуглинистый и разрез-132-19 – Т – Tmr – Bcrn – Bg – Gox – G – торфяно-глеезем окисленно-глеевый тяжелосуглинистый (Занина О.Г., Лопатина Д.А., 2022).

Выявлено, что состав и профильное распределение микробиоморф носит убывающий с глубиной характер. В изученных почвах выявлены несколько зон аккумуляции микробиоморф. Первый приурочен к поверхности минеральной части профилей современных почв. Присутствие двух других аккумулятивных зон может быть связано с криотурбированным материалом органогенных горизонтов, занесённым в надмерзлотную часть профилей и его накоплением в период максимальной оттайки.

В исследованных профилях доля таких микробиоморф, как спикеры губок, раковинные амёбы мала. Содержание пылицы, спор и фитолитов варьируют в одинаковых горизонтах почв, в то время как насыщенность растительным детритом и остатками грибов значительна, особенно это характерно для органо-аккумулятивных горизонтов. В образцах отмечено большое разнообразие морфологических форм диатомовых водорослей.

Фитолитный анализ показал, что в составе спектров доминируют разнообразные удлинённые, ланцетные, округлые, овальные, трапециевидные и цилиндрические формы. Как правило, гладкие удлинённые, трапециевидные и ланцетные формы преобладают. Выявлено, что наибольшее количество и разнообразие палинологических остатков характерно для горизонтов АУт, Т и Т2, а фитолитов – для первого минерального горизонта, затем количество фитолитов с глубиной уменьшается. Не содержат фитолитов горизонт переходный к материнской породе и материнская порода. В горизонте Bghi при обильных включениях торфоподобного органического вещества количество фитолитов возрастает. Это, как правило, фитолиты трав, осок, злаков и мхов. Для горизонтов Bg, G, Gox, G@ выявлено резкое уменьшение количества и разнообразия фитолитов.

В большинстве изученных образцов на органических биоморфах отмечены разрушения – разрывы и трещины. Практически во всех горизонтах содержащих палиноморфы выявлены поврежденные пыльцевые зёрна родов *Betula* и *Pinus*. Следует

отметить, что повреждения выявлены также на кремнистых микрофоссилиях – фитолитах, спикулах губок и панцирях диатомовых водорослей, часто встречаемых в исследованном материале. Наиболее часто диагностируются растрескивания и сколы у кремнистых микрофитофоссилий, что вероятно связано с длительным нахождением их в переувлажнённом сезонно-талом слое при попеременном чередовании циклов промерзания и оттаивания [Лопатина Д.А. и др., 1912].

На данном этапе исследования не удалось выявить достоверную связь уменьшения насыщенности профилей почв фитолитами с разрушением последних, равно как и связь разрушений и форм фитолитов. Работы по изучению сохранности будут продолжены, так как они дают возможность оценить репрезентативность комплекса микробиоморф. Таким образом, полученные данные могут использоваться как дополнительный критерий при реконструкции палеогеографических условий формирования четвертичных отложений криолитозоны.

*Занина О.Г., Лопатина Д.А.* Биоиндикаторы условий формирования верхнеплейстоценовых каргинских и сартанских отложений Колымской низменности и особенности их тафономии при многократном воздействии криогенных факторов. Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2022. Т. 30. № 5. С. 111-128.

*Лопатина Д.А., Занина О.Г., Фёдоров-Давыдов Д.Г.* Особенности сохранности спор и пыльцы в почвах в зоне распространения многолетнемерзлых отложений Якутии. Почвоведение. 2022. № 8. С. 962-974.

## Состав почвенной макрофауны постагрогенных экосистем в тундровой зоне (Воркутинский район, Республика Коми)

*Конакова Т.Н., Дутц А.А.*

*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар, Россия*

*e-mail: konakova@ib.komisc.ru*

Сельскохозяйственное освоение тундры в окрестностях г. Воркута берет свое начало с 70-х гг. XX в., когда И.С. Хантимером была разработана методика «залужения» тундр – создания многолетних сеяных лугов в природно-климатических условиях Крайнего Севера. Освоение проводилось путем многократной обработки дисковой, а затем рельсовой бороной. Уничтожение мохово-лишайниковой подстилки способствовало изменению режима промерзания и оттаивания почвы, а древесные и моховые остатки, попавшие при освоении в верхний глеево-тиксотропный горизонт, оставались длительное время слабо разложившимися и способствовали улучшению физических свойств освоенного слоя. Для создания лугов использовались местные многолетние травы – мятлик луговой (*Poa pratensis* L.) и лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.). Площадь сеяных лугов, созданных по методу «залужения», только за первое десятилетие достигла около 2000 га и в дальнейшем постоянно возрастала. В конце 90-х гг. использование сеяных лугов в условиях Заполярья стало постепенно снижаться, а в начале 2000-х гг. полностью прекратилось [Арчегова и др., 2002]. Подобные изменения в экосистеме не могли не сказаться на сообществах почвенных беспозвоночных. Поэтому цель настоящей работы заключалась в первичной оценке таксономического разнообразия почвенной макрофауны постагрогенных экосистем тундровой зоны.

В качестве таких ПАЭ нами были обследованы три участка. Первый – сеяный луг, освоение которого проводилось с 1955 г. до 2000 г. Луг был засеян смесью многолетних трав местной популяции мятлика и лисохвоста. Участок 2 представляет собой крупнозлаковый луг с доминированием костреца безостого, сформировавшийся после прекращения хозяйственного использования в 2001 г. Ранее в течение 40 лет на данном участке возделывали преимущественно однолетние культуры (овес и овсяно-гороховую смесь). Участок 3 – разнотравно-злаковый луг, зарастающий ивой. Луг находился в хозяйственном пользовании более 35 лет (до 2000 г.), для посева использовали смесь мятлика лугового и лисохвоста лугового с внесением органических и минеральных удобрений. Для учета почвенной макрофауны на каждом участке в июле и августе 2016 г. было отобрано по 10 проб размером 10x10 см с последующей выгонкой в лаборатории Института биологии с помощью воронок Тульгрена до полного иссушения субстрата. В июле 2017 г. на каждом участке было отобрано по 8 проб размером 25x25 см с последующей ручной разборкой на месте. Всего было собрано около 900 экз. крупных почвенных беспозвоночных.

Почвенная макрофауна постагрогенных экосистем включает 16 таксонов. На участках 1 и 3 было отмечено по 12-13 таксонов макрофауны, на участке 2 – 14 таксонов. В результате проведенных исследований зарегистрировано три вида дождевых червей *Eisenia n. nordenskioldi* [Eisen, 1873], *Dendrobaena octaedra* [Savigny, 1826] и *Octolasion lacteum* [Oerley, 1885]. Дождевые черви были отмечены на всех участках. Если первые два вида являются типичными представителями зональных тундр, то червь *O. lacteum*, зарегистрированный на участках 1 и 3, впервые отмечен для тундровой зоны Республики Коми. На территории республики данный вид встречается в различных биотопах, высокой численности достигает на полях и огородах [Колесникова и др., 2023]. Однако эта находка требует подтверждения. Колеоптерофауна постагрогенных экосистем представлена восьмью семействами. Из отряда жесткокрылых были отмечены жужелицы, стафилиниды, щелкуны, листоеды, долгоносики, мягкотелки, пилюльщики, лейодиды и пластинчатоусые. Среди карабид зарегистрировано шесть видов, при этом наибольшее число видов отмечено на участке 3, а на участке 2 отмечены лишь их личинки. На лугу, зарастающим ивой, также отмечено наибольшее количество видов коротконадкрылых жуков (9 видов). В большом количестве в

постагрогенных экосистемах присутствуют личинки Diptera, а также равнокрылые и трипсы. Стоит отметить, что в наших сборах не были зафиксированы многоножки (Lithobiidae), при этом в тундровых биотопах окрестностей г. Воркута численность *Lithobius curtipes* C.L. Koch, 1847 может достигать 11 экз./м<sup>2</sup> [Таскаева и др., 2017].

Таким образом, первичная оценка таксономического разнообразия макрофауны постагрогенных экосистем в тундровой зоне выявила 25 видов крупных почвенных беспозвоночных, в большей степени характерных для зональных тундр. При этом отмечены также виды свойственные местообитаниям, подвергшимся хозяйственной деятельности человека. Сохранение зонального ядра состава почвенной макрофауны в агроценозах было показано ранее и в ряде других работ. Тем не менее для выявления роли факторов, участвующих в поддержании разнообразия почвенной макрофауны в суровых климатических условиях Крайнего Севера, а также этапов восстановления почвенных зооценозов необходимы дальнейшие исследования постагрогенных экосистем юго-востока Большеземельской тундры.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела экологии животных Института биологии Коми НЦ УрО РАН за помощь при сборе материала. Работа выполнена в рамках государственного задания «Разнообразие фауны и пространственно-экологическая структура животного населения европейского северо-востока России и сопредельных территорий в условиях изменения окружающей среды и хозяйственного освоения» (№ 122040600025-2)

*Арчегова И.Б., Котелина М.С., Панюков А.Н.* Посттехногенные территории Севера. СПб: Наука. 2002. 160 с.  
*Колесникова А.А., Долгин М.М., Акулова Л.И.* Дождевые черви (Oligochaeta, Lumbricidae) Республики Коми // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 1. С. 19-36. DOI: 10.17076/bg1550  
*Таскаева А.А., Колесникова А.А., Конакова Т.Н., Кудрин А.А.* Зооэдафон восточно-европейских тундр // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2017. №34(32). С.15-25.

## Микробоценозы пирогенно-трансформированных мерзлотных тундровых почв Якутии

*Ермолаева С.В., Кузьмина Н.П., Чевычелов А.П.*

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Россия*

*e-mail: erel1982@mail.ru sveta\_efa@mail.ru*

Роль пирогенного фактора особенно велика в условиях распространения многолетней мерзлоты. Микроорганизмы, являясь активным компонентом лесного биогеоценоза, одними из первых реагируют на пирогенные воздействия [Сорокин, 2009]. Наши исследования проводились в Северной Якутии, на территории Яно-Индибирской низменности в 2022 г. Целью исследования являлось изучение количественного состава основных эколого-физиологических групп микроорганизмов мерзлотных тундровых почв Северной Якутии и выявление корреляции между гидротермическим режимом почв. Диагностика и классификация изучаемых почв осуществлялась в соответствии с классификацией мерзлотных почв Якутии [Еловская, 1987] состав и свойства почв определялись по общепринятым методикам. Пробы для микробиологического анализа отбирались по стандартной методике. Численность культивируемых микроорганизмов определяли методом посева на селективные питательные среды [Методы..., 1980].

В 2020 г. в районе исследований в условиях маловодного года и засушливого лета произошел сильный тундровый пожар. В течение 2 лет после пожара морфологический профиль мерзлотной тундровой глееватой почвы (разрез 2Ч-22), имевший вид: O(0-4)–A0A1(4-9)–BCg(9-19 см), трансформировался в таковой мерзлотной тундровой перегнойно-глеевой (разрез 3Ч-22), характеризующийся следующим строением: Apir(0-6/9)–BCg(6/9-38)–G(38-54 см). При этом органогенные горизонты O и A0A1 первичной почвы полностью выгорели и минерализовались и на их месте сформировался гор. Apir с включением черных древесных углей. Мощность сезонно-талого слоя (СТС) исходной почвы увеличилась с 19 до 54 см, то есть в 2,8 раза. В протаявшей толще минеральных горизонтов температура возросла с 1,1-2,3°C до 2,3-6,1°C, глубина проникновения положительных  $t$  в почву увеличилась с 15 до 40 см, а полевая влажность гор. BCg также возросла с 56 до 66%, то есть увеличилась в среднем на 10 %. Значительно изменились также физико-химические свойства исследуемых тундровых почв. Реакция среды в контрольной почве разреза 2Ч-22 характеризовалась по всему профилю как сильноокислая, а в пирогенно-трансформированной почве разреза 3Ч-22 – уже в гор. Apir и BCg как кислая, а в надмерзлотном гор. G – даже как слабощелочная, при этом рН<sub>н2о</sub> соответственно увеличился на 0,9-1,1 и 3,7 единицы. Эти отмеченные изменения являются следствием выгорания и минерализации почвенного органического вещества, а также изменения окислительно-восстановительного потенциала и влажности данных почв в процессе деградации многолетней мерзлоты и увеличения мощности СТС.

По результатам микробиологического анализа, количество микроорганизмов в тундровых почвах колебалось от  $4,5 \pm 1,8 \times 10^2$  до  $2,7 \pm 0,3 \times 10^6$  КОЕ/г. Максимальные значения по численности всех исследуемых групп микроорганизмов были найдены в мерзлотной тундровой перегнойно-глеевой почве разреза 3Ч-22 (табл. 1) в горизонте Apir. Следовательно, по общей численности микроорганизмов (ОЧМ), наиболее насыщенным оказался микробоценоз мерзлотной тундровой перегнойно-глеевой почвы разреза 3Ч-22 ( $4,0 \pm 1,9 \times 10^6$  КОЕ/г), в то время как в микробоценозе мерзлотной тундровой глееватой почвы разреза 2Ч-22 –  $1,9 \pm 0,7 \times 10^5$  КОЕ/г, что оказалось на порядок меньше. Как отмечено выше, после пожара увеличилась мощность СТС, а также температура, влажность и актуальная кислотность пирогенно-трансформированной почвы разреза 3Ч-22. Все эти изменения способствовали активизации жизнедеятельности почвенных микроорганизмов данной мерзлотной тундровой почвы. Изучаемые микробоценозы двух типов этих почв содержали исследованные группы микроорганизмов в разном соотношении. Из полученных данных по численности микроорганизмов было рассчитано процентное соотношение тех или иных

групп микроорганизмов от ОЧМ в каждой почве. Так, в микробоценозе исходной мерзлотной тундровой глееватой почвы преобладали бактерии на МПА, то есть аммонификаторы и составляли – 60%, а также в меньших количествах мицелиальные грибы – 25% и бактерии на среде Эшби – 13%. Содержание актиномицетов в этой почве оказалось минимальным, равным 1,5%. Кислая среда данной почвы способствовала развитию мицелиальных грибов. В пирогенно-трансформированной тундровой перегнойно-глеевой почве содержание всех исследуемых групп микроорганизмов было примерно равным, можно сказать сбалансированным, когда бактерии на МПА составляли 28%, бактерии на среде ЭШБИ – 27%, актиномицеты – 22% и мицелиальные грибы – 23%. При этом нужно отметить, что в пирогенно-трансформированной почве появились актиномицеты. Обнаружение значительного количества актиномицетов в данной почве может свидетельствовать об интенсивности протекания процессов разложения сложных органических веществ и минерализации гумуса. Следовательно, в отличие от исходной мерзлотной почвы, пирогенно-трансформированная почва оказалась наиболее биогенной и плодородной.

Горизонт	Глубина, см	Бактерии на МПА	Бактерии на Эшби	Актиномицеты на КАА	Грибы на Чапека	Целлюлозолитики на Гетчинсона
		КОЕ/г				
Мерзлотная тундровая глееватая почва, разрез 2Ч-22						
О	0-4	6,4±1,8×10 <sup>4</sup>	6,4±4,9×10 <sup>4</sup>	0	1,2±0,4×10 <sup>5</sup>	0
А0А1	4-9	2,4±1,4×10 <sup>4</sup>	8,2±8,3×10 <sup>3</sup>	8,2±8,3×10 <sup>3</sup>	0	4,5±1,8×10 <sup>2</sup>
ВСg	9-19	2,5±1,3×10 <sup>5</sup>	0	0	1,5±1,5×10 <sup>4</sup>	0
Мерзлотная тундровая перегнойно-глеевая почва, разрез 3Ч-22						
Аpг	0-6/9	2,6±0,2×10 <sup>6</sup>	1,7±0,3×10 <sup>6</sup>	2,7±0,3×10 <sup>6</sup>	2,2±1,1×10 <sup>6</sup>	0
ВСg	10-20	5,0±2,9×10 <sup>5</sup>	1,5±0,7×10 <sup>6</sup>	5,0±2,8×10 <sup>5</sup>	9,0±5,4×10 <sup>5</sup>	0
ВСg	28-38	1,1±0,7×10 <sup>6</sup>	8,8±4,4×10 <sup>5</sup>	2,7±1,7×10 <sup>5</sup>	4,8±2,5×10 <sup>5</sup>	9,0±1,5×10 <sup>2</sup>
G	40-50	1,6±0,8×10 <sup>5</sup>	8,0±4×10 <sup>4</sup>	6,6±3,8×10 <sup>4</sup>	6,6±3,3×10 <sup>4</sup>	3,7±0,9×10 <sup>3</sup>

Табл. 1. Численность микроорганизмов в тундровых почвах Северной Якутии, 2022 г.

Корреляционный анализ зависимости количества микроорганизмов от гидротермических показателей почв показал, что в тундровой почве разреза 2Ч-22 численность олигонитрофильных бактерий и мицелиальных грибов зависела от влажности и температуры почвы ( $r = 0,95-0,99$ ). У остальных групп микроорганизмов коэффициент корреляции был низким. В мерзлотной почве разреза 3Ч-22 у всех исследуемых групп микроорганизмов наблюдали высокую корреляционную связь с температурой ( $r = 0,84-0,99$ ). Таким образом, пирогенные изменения мерзлотной тундровой почвы коснулись не только её физико-химических свойств, но и микробных комплексов. В течение 2 лет после пожара, почва трансформировалась в перегнойно-глеевую и по микробиологическим характеристикам стала более биогенной и плодородной.

Еловская Л.Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 172 с.  
 Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.  
 Сорокин Н.Д. Микробиологическая диагностика лесорастительного состояния почв Средней Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 222 с.

## Адаптации микроорганизмов к холоду

*Кузяков Я.В.*

*Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия*

*Университет Геттинген, Геттинген, Германия*

Изучая почвы холодных зон, в частности тундр, Арктики и Антарктики, а также высокогорных районов, мы практически всегда рассуждаем о потеплении климата, и ускорении всех биологических процессов, ведущих к ускорению циклов углерода, азота и других элементов. При этом мы практически никогда не задумываемся о том, что жизнь микроорганизмов, ответственных за эти процессы, проходит в исключительно неблагоприятных условиях. Это далеко не только длительный период времени года с отрицательными температурами, а также и регулярное промерзание, и оттаивание; образование кристаллов льда, разрушающих любые органические структуры клеток; длительный период времени отсутствия поступления любых источников органического углерода и, соответственно, энергии; дегидратация клеток; инактивация ферментов; необходимость быстро реагировать даже на незначительные и очень короткие периоды потепления; и многое другое. Целью доклада является обзор основных механизмов адаптации микроорганизмов к экстремально холодным условиям.

Классификация микроорганизмов по оптимальным условиям существования и максимальным скоростям роста на психрофилы, психротрофы, мезофилы и термофилы позволяет рассмотреть их адаптации к различным температурным режимам. Будут рассмотрены основные принципы и абиотические факторы, влияющие на психрофильные микроорганизмы при промерзании и их адаптации к холоду. Такие адаптации включают: существенное увеличение концентрации белков в цитоплазме, производство антифризовых веществ, уменьшение ригидности липидов клеточных мембран за счет ненасыщенных жирных кислот, накопление «жира», и другие. Особенно важно отметить производство ферментов с низкой афинностью к субстрату (высоким  $K_m$ ), ведущим к ускорению реакций даже при низких температурах, а также низкие затраты энергии для получения ферментов с термически нестабильной структурой.

В конце будет представлен ряд экспериментов по изменению утилизации специфически  $^{14}C$  и  $^{13}C$  меченой глюкозы почвенными микроорганизмами от +5 до  $-20^{\circ}C$ , ведущей к изменению метаболических путей и адаптации клеточных мембран. При понижении температуры ниже нуля, микроорганизмы переходят от пентозофосфатного цикла к гликолизу, а при достижении температур порядка  $-20^{\circ}C$  к совмещению этих циклов. Адаптация клеточных стенок грибов при замерзании основана на увеличении ненасыщенности жирных кислот, в то время как аналогичный механизм типичен только для грам-отрицательных бактерий и отсутствует у грам-положительных.

Суммируя, психрофильные микроорганизмы выработали целый ряд адаптаций к исключительно неблагоприятным – холодным – условиям и могут оставаться активными как минимум до  $-20^{\circ}C$ . Эти адаптации фиксированы на генетическом уровне и происходят при производстве отдельных биохимических веществ, изменении метаболизма, перестройки органелл и структур клеток, а также изменении микробного сообщества.

## Влияние зональных и ландшафтных условий на формирование микробных сообществ в почвах бугристых болот криолитозоны Европейского Северо-Востока

*Лаптева Е.М., Перминова Е.М., Виноградова Ю.А., Ковалева В.А.*  
*Институт биологии Коми НЦ УрА РАН, Сыктывкар, Россия,*  
*e-mail: elena.lapteva.60@mail.ru*

Важным компонентом наземных экосистем, определяющим скорость и закономерности трансформации растительного опада, специфику формирования системы почвенного органического вещества, скорость и направление потоков парников газов, являются микробные сообщества почв. В условиях криолитозоны на формирование пула почвенной микробиоты и ее функционирование существенное влияние оказывают суровые климатические условия и наличие многолетней мерзлоты. Цель данной работы заключалась в выявлении особенностей распределения основных групп микроорганизмов (бактерии, микроскопические грибы) в системе СТС–ММП торфяных почв мерзлых бугристых болот Арктики и Субарктики европейского северо-востока России (ЕСВР) и изменения их параметров в ряду: лесотундра → южная тундра → северная тундра криолитозоны ЕСВР.

Объектами исследования послужили микробные сообщества почв и торфяной залежи 6 ключевых участков с плоскобугристыми болотными массивами: два из них приурочены к зоне лесотундры (ЛТ1, ЛТ2), два – к подзоне южной тундры (ЮТ1, ЮТ2) и два – северной тундре (СТ1, СТ2). Во всех биоклиматических зонах/подзонах отбор проб проводили в пределах плоских торфяных бугров и осоково-сфагновых мочажинах (топях). На торфяных буграх растительный покров представлен кустарничково-моховыми сообществами с участием *Ledum decumbens*, *Betula nana*, *Rubus chamaemorus*, мхов – *Sphagnum fuscum*, *S. russowii*, *Polytrichum spp.*, *Dicranum spp.* и лишайников, развитых преимущественно в межбугорковых понижениях. Образцы торфа из СТС отбирали послойно с учетом ботанического состава торфа и степени его разложения, из ММП – методом ручного бурения через каждые 10 (до глубины 1 м) и 20 (глубже 1 м) см. В образцах торфа определяли численность бактерий, спор грибов и длину их мицелия методом прямого микроскопирования с использованием флуорохромных красителей с последующим расчетом величины биомассы микроорганизмов [Лысак и др., 2009]. Функциональное состояние микробных сообществ оценивали методом мультисубстратного тестирования (МСТ) [Методика..., 2010]. Выделение и учет микромицетов осуществляли на подкисленной среде Чапека, среде Гетчинсона, среде Сабуро и сусло-агаре при разных температурах оттаивания замороженных образцов торфа (+25, +35, +52°C) и культивирования посевов (+4, +25°C) [Озерская и др., 2008]. Названия и положения таксонов унифицировали с помощью базы данных CBS ([www.indexfungarum.org](http://www.indexfungarum.org)) и MycoBank (<http://www.mycobank.org>).

Обобщение полученных данных показало, что в торфяных почвах рассмотренных плоскобугристых болот численность и биомасса различных групп микроорганизмов варьируют в широких пределах: число клеток бактерии варьирует от нулевых значений до 31 млрд кл./г а.с.п.; спор грибов – от 20 до 510 млн кл./г а.с.п., длина мицелия – от нулевых значений до 5400 м/г а.с.п.; суммарная биомасса микроорганизмов – от 127 до 22125 мкг/г а.с.п. (в зависимости от горизонта). Вклад бактерий в структуру биомассы СТС торфяной залежи составляет 0.2-11.5%, ММП – 1.5-36.7%. СТС торфяной залежи, как правило, характеризуются меньшими величинами численности бактерий и спор грибов по сравнению с многолетнемерзлой толщей торфа.

В составе бактерий, как правило, преобладают функционально неактивные клетки (бактерии с нарушенной клеточной мембраной) в торфяниках лесотундры отмечено присутствие и функционально активных (живой мицелий), и функционально неактивных (мертвый мицелий) гиф, в торфяниках тундры зафиксировано присутствие только функционально активного мицелия. Для торфяников южной тундры характерны более



высокое функциональное разнообразие микробных комплексов и их метаболическая активность, по сравнению с северной тундрой. Показано, что почвенные микробные комплексы рассмотренных болотных экосистем характеризуется отсутствием микроорганизмов, потребляющих в качестве источников энергии лимонную, малеиновую, уксусную и азотсодержащую (креатин) низкомолекулярные органические кислоты, а из спектра аминокислот – глицин, валин, аргенин и треонин. В торфяниках северной тундры, по сравнению с южной, отмечена меньшая активность потребления ди- и трисахаридов, инезита и сорбита.

Комплекс культивируемых микромицетов в торфяной залежи плоскобугристых болот криолитозоны ЕСВР представлен 72 видами, не считая две формы стерильного мицелия. Основу комплекса составляют анаморфные виды (отдел Ascomycota) – 59 видов, отдел Mucogomycota представлен 13 видами. По числу видов доминируют роды: *Penicillium* (31 вид), *Mortierella* (6 видов), *Aspergillus* (5). Роды *Trichoderma*, *Talaromyces*, *Mucor* включают по 4 вида, *Umbelopsis* и *Chaetomium* – по 3 вида, остальные роды – 1-2 вида. Все комплексы микромицетов характеризуются высоким обилием видов рода *Penicillium* (*P. canescens* – 13-18%, *P. simplicissimum* – 8-43%, *P. spinulosum* – 6-17%), *Pseudogymnoascus pannorum* (13-31%) и стерильного мицелия (18-35%). В направлении от лесотундры к северной тундре отмечено снижение видового разнообразия культивируемых микромицетов в почвах бугристых торфяников.

Зональные различия в микробных комплексах торфяных почв бугристых болот криолитозоны ЕСВР наиболее четко прослеживаются при оценке длины мицелия микроскопических грибов и величины микробной биомассы, которая в СТС на 88-98% определяется вкладом эукариот (спор грибов и их мицелия). Отмечено уменьшение в направлении с юга (лесотундра) на север (северная тундра): (1) глубины проникновения грибного мицелия вниз по профилю торфяной залежи (в лесотундре 100-160 см, в северной тундре – 20 см); (2) размеров гиф грибов (в лесотундре толщина мицелия 4-6 мкм, в северной тундре – 4 мкм); (3) величины микробной биомассы.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, № 122040600023-8.

Лысак Л. В., Лапыгина Е. В., Конова И. А., Звягинцев Д. Г. Определение физиологического состояния бактерий в почве с помощью люминесцентного красителя L 7012 // Изв. РАН. Сер. биол. 2009. Т. 36, № 6. С. 750–754.

Методика выполнения измерений интенсивности потребления тест-субстратов микробными сообществами почв и почвоподобных объектов фотометрическим методом: ФР.1.37.2010.08619., ПНД Ф Т 16.1.17-10. М., 2010. 13 с.  
Озерская С. М., Кочкина Г. А., Иванушкина Н. Е., Князева Е. В., Гилчинский Д. А. Структура комплексов микромицетов в многолетнемерзлых грунтах и криопэгах Арктики // Микробиология. 2008. Т. 77, № 4. С. 542–550.

## Кинетические характеристики гетеротрофных микробных сообществ мерзлотных почв Средней Сибири

Масягина О.В.<sup>1</sup>, Матвиенко А.И.<sup>1</sup>, Пономарёва Т.В.<sup>1,2</sup>, Гродницкая И.Д.<sup>1,2</sup>, Евграфова С.Ю.<sup>1,2,3</sup>

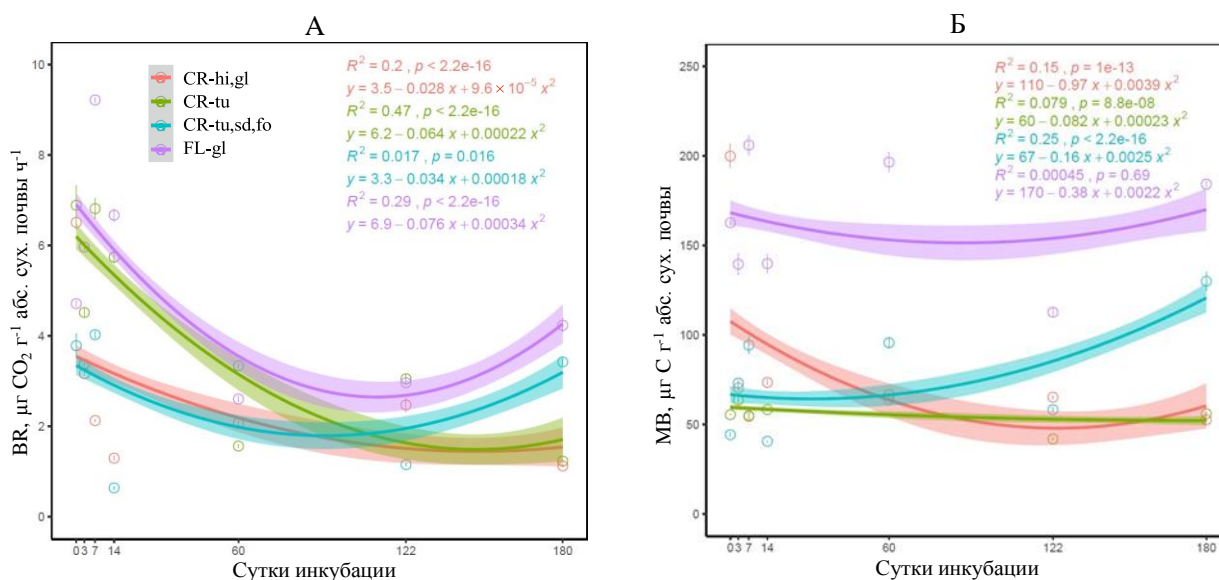
<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

e-mail: oxanamas@ksc.krasn.ru

Климатические изменения в арктических экосистемах в большей степени зависят от изменения климата в зимний период (IPCC, 2014). Почвенные микроорганизмы, в свою очередь, могут сохранять метаболическую активность и увеличивать период выделения CO<sub>2</sub> из почвы при температурах ниже 0°C [Segura et al., 2019]. Поэтому для того, чтобы оценить варьирование потоков углерода (C) из мерзлотных почв не только в течение вегетационного сезона, но и в зимний период, был проведен 6-месячный инкубационный эксперимент по оценке микробной активности 4-х типов почв, который включал температурные режимы, характерные как для активного (первые 2 недели инкубирования), так и для зимнего периода (в течение 5.5 месяцев) [Masyagina et al., 2023]. Базальное дыхание (BR) и микробная биомасса почвы (MB) использовались в качестве показателей для оценки микробной активности почвы.



**Fig. 1.** Базальное дыхание (А) и микробная биомасса (Б), измеренные у Histic Gleyic Cryosols (CR-hi,gl), Turbic Cryosols (CR-tu), Turbic Spodic Folic Cryosols (CR-tu,sd,fo), and Gleyic Fluvisols (FL-gl) в течение 6-месячного инкубационного эксперимента. На графиках показаны средние и ошибки средних из 50-ти bootstrap-повторностей, определенных для каждой даты измерения.

Инкубационный эксперимент показал исходные различия в микробной активности 4-х типов почв (Histic Gleyic Cryosols, Turbic Cryosols, Turbic Spodic Folic Cryosols и Gleyic Fluvisols), расположенных в пределах Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района и города Норильска (рис. 1). В начале инкубационного эксперимента при температуре почвы выше +10°C, в Turbic Cryosols были зафиксированы наибольшие значения параметра BR = 6.89 µg CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> сух. почвы ч<sup>-1</sup>, при довольно невысоких значениях MB = 135.10 µg C

г<sup>-1</sup> сух. почвы. У Turbic Spodic Folic Cryosols были минимальные среди всех изученных почв значения BR (3.78 μг CO<sub>2</sub> г<sup>-1</sup> сух. почвы ч<sup>-1</sup>) и MB (44.25 μг С г<sup>-1</sup> сух. почвы). Histic Gleyic Cryosols демонстрировали достаточно высокие величины MB (199.87 μг С г<sup>-1</sup> сух. почвы) и BR (6.51 μг CO<sub>2</sub> г<sup>-1</sup> сух. почвы ч<sup>-1</sup>), а у Gleyic Fluvisols были высокие значения MB (162.68 μг С г<sup>-1</sup> сух. почвы) и достаточно низкие значения BR (4.71 μг CO<sub>2</sub> г<sup>-1</sup> сух. почвы ч<sup>-1</sup>). Несмотря на это, в конце инкубации Gleyic Fluvisols показали наибольшую кумулятивную эмиссию CO<sub>2</sub> – около 30% в расчете на органический С почвы (Сорг). В свою очередь, для Histic Gleyic Cryosols с высоким исходным содержанием Сорг = 4% и самыми высокими среди изученных почв значениями MB, была выявлена низкая кумулятивная эмиссия CO<sub>2</sub> – 2.4% в расчете на Сорг. Во всех типах почв на начало инкубации преобладала функционально-экологическая группа копиотрофов (50-56%), а на конец инкубации доминировали олиготрофы (38-84%). Полученные результаты в будущем позволят понять и оценить специфические реакции различных типов почв в криолитозоне Средней Сибири

**В ОТВЕТ НА** климатические изменения в высоких широтах.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №21-17-00163.

IPCC 2014. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / *R. Pachauri and L. Meyer (eds)*, Geneva, Switzerland, IPCC, 151 p., hdl:10013/epic.45156.d001.

*Masyagina O.V., Matvienko A.I., Ponomareva T.V., Grodnitskaya I.D., Sideleva E.V., Kadutskiy V.K., Prudnikova S.V., Bezbido V.S., Kudryavtseva K.A., Evgrafova S.Y.* Soil contamination by diesel fuel destabilizes the soil microbial pools: Insights from permafrost soil incubations // *Environmental Pollution*, 2023, Vol. 323, 121269.

*Segura J.H., Nilsson M.B., Schleucher J., Haei M., Sparrman T., Székely A., Bertilsson S., Öquist M.G.* Microbial utilization of simple carbon substrates in boreal peat soils at low temperatures // *Soil Biol. Biochem.*, 2019, Vol. 135, pp. 438-448. DOI: 10.1016/j.soilbio.2019.06.006.

## Почвенный микробиом поселка Диксон

*Никитин Д.А.<sup>1,4</sup>, Лысак Л.В.<sup>2</sup>, Евграфова С.Ю.,<sup>3</sup> Яковлева С.А.<sup>2</sup>, Усова А.П.<sup>4</sup>, Мергелов Н.С.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им.М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*

<sup>4</sup>*Институт географии РАН, Москва, Россия*

*e-mail: dimnik90@mail.ru*

Диксон – самый северный порт России – расположен на северо-западе полуострова Таймыр. Температура августа не превышает +8°C, а января – -25°C. Район Диксона относится к северной и типичной тундре [Матвеева, Заноха, 2017]. Почвенный покров представлен криоземами, тундрово-болотными и тундрово-глеевыми почвами [Михайлов, 2020]. Микроорганизмы, обитающие в почве, осуществляют ряд экологических функций, поэтому их изучение необходимо для понимания функционирования любых наземных экосистем Арктики [Flossco et al., 2019].

Цель работы – оценка структуры биомассы микобиоты, численности рибосомальных генов микроорганизмов, а также количества КОЕ и таксономического разнообразия культивируемых микромицетов в почвах поселка Диксон.

Исследованные почвы в районе поселка Диксон относятся к криоземам глееватым/Охуаquic Cryosol (Arenic), криоземам урбистратифицированным/Stagnic Folic Cryosol и глееземам мерзлотным криотурбированным/Stagnic Folic Cryosol. Образцы для микробиологических исследований отобраны методом усреднения пяти единичных проб с возможными мерами по предотвращению контаминаций и хранились в стерильных емкостях при температуре -18°C. Физические и химические параметры почвы определяли в воздушно-сухих образцах.

Биомассу грибов и прокариот определяли методом люминесцентной микроскопии. Тотальную ДНК экстрагировали из почвенных образцов массой 0.2 г с помощью набора PowerSoil DNA Isolation Kit (MO BIO Laboratories, США) согласно протоколу производителя. Первичную обработку почвенных образцов проводили с использованием гомогенизатора Precellys 24 (Bertin Technologies, Франция). Количественную оценку содержания рибосомальных генов бактерий, архей и грибов осуществляли методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) в реальном времени. Для учета архей и бактерий использовали праймеры на ген 16S рРНК, для учета грибов – на регион ITS. Численность и таксономический состав культивируемых микроскопических грибов и бактерий определяли методом микробиологического посева.

Биомасса грибов изменялась от 0.081 до 0.239 мг/г почвы, снижаясь от органогенных к минеральным горизонтам. Однако профиль криозема урбистратифицированного характеризовался иным распределением биомассы грибов с максимумом в подповерхностных слоях. Длина мицелия изменялась от 20.5 до 258.8 м/г почвы, уменьшаясь сверху вниз по профилям. Доля мицелия в общей грибной биомассе существенно уменьшалась от поверхностных горизонтов (53-76%) к глубинным (32-56%). Диаметр большинства (52-64%) гиф не превышал 3 мкм. Для минеральных горизонтов типично преобладание мелких (2-3 мкм) спор и дрожжей, численность которых не превышала  $10^3$ - $10^4$  клеток/г почвы. Крупные споры диаметром 5 мкм выявлены (до  $10^2$  клеток/г почвы) исключительно в органогенных горизонтах.

Около 52% пропагул округлой формы с гладкой поверхностью, 16% округлые и шероховатые, 18% – овальные с гладкой поверхностью, 14% овальные с неровной поверхностью. Численность прокариот варьировала от  $1.8 \times 10^8$  до  $6.4 \times 10^9$  клеток/г почвы, уменьшаясь от поверхностных слоев к глубинным. Длина мицелия актиномицетов крайне мала и не превышала 15 м/г почвы. Для большинства образцов актиномицеты не выявлены. Численность копий рибосомальных генов 16S рРНК архей мала и изменялась от  $4.34 \times 10^7$

до  $1.49 \times 10^9$  копий генов/г почвы. Количество копий генов 16S рРНК бактерий варьировало от  $8.40 \times 10^8$  до  $2.31 \times 10^{10}$  копий генов/г почвы. Численность рибосомальных генов ITS рРНК грибов изменялась – от  $7.60 \times 10^5$  до  $1.00 \times 10^9$  копий генов/г почвы. Для большинства исследованных профилей количество генетического материала всех микроорганизмов уменьшалось от поверхностных горизонтов к надмерзлотным.

При  $+25^\circ\text{C}$  выявлено 17 родов микромицетов, численность которых варьировала от  $1.1 \times 10^3$  до  $9.8 \times 10^3$  КОЕ/г почвы, снижаясь от поверхностных органогенных горизонтов к глубинным. Причем 10 выделенных родов (*Acremonium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Neosartorya*, *Sarocladium*, *Teberdinia*) не были выявлены при низкой температуре ( $+5^\circ\text{C}$ ). При  $+5^\circ\text{C}$  выявлено 13 родов микромицетов, численность которых варьировала от  $4.7 \times 10^2$  до  $6.5 \times 10^3$  КОЕ/г почвы, снижаясь от поверхностных органогенных горизонтов к глубинным. причем 4 из них (*Goffeauzyma*, *Hannaella*, *Phialocephala*, *Rhodotorula*) не были выявлены при повышенной ( $+25^\circ\text{C}$ ) температуре. Численность культивируемых бактерий составляла от  $1.4 \times 10^5$  до  $5.4 \times 10^6$  КОЕ/г почвы. Доминировали бактерии родов *Arthrobacter* и *Bacillus*; субдоминантами выступал роды *Micrococcus*, *Proteobacteria*, *Rhodococcus*; минорные компоненты включали в себя представителей родов *Erwinia*, *Flexibacter*, *Micrococcus*, *Streptomyces*.

Таким образом, впервые произведено комплексное (с применением классических и молекулярно-генетических методов) исследование почвенного микробиома поселка Диксон. Показано преобладание в почвенном покрове криоземов, биологическая активность которых относительно велика, но снижается вниз по профилю. Интерес представляет практически полное отсутствие мицелиальных бактерий (актиномицетов) – одного из основных компонентов микробиома большинства зональных типов почв. В проанализированных почвах Диксона преобладали психротолерантные и психрофильные штаммы, однако велика доля рудеральных таксонов, не развивающихся при пониженных температурах и, по-видимому, инвазивных для региона.

#### Благодарность.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 21-17-00163.

Матвеева Н.В., Заноха Л.Л. Изменения во флоре сосудистых растений в окрестностях пос. Диксон (Западный Таймыр) с 1980 по 2012 г // Ботанический журнал. 2017. Т. 102. №. 6. С. 812-846.

Михайлов И.С. Изменение почвенно-растительного покрова в Высокой Арктике Восточной Сибири // Почвоведение. – 2020. – №. 6. – С. 663-672.

Flocco C.G., Mac Cormack W.P., Smalla K. Antarctic soil microbial communities in a changing environment: their contributions to the sustainability of Antarctic ecosystems and the bioremediation of anthropogenic pollution / The ecological role of microorganisms in the Antarctic environment. 2019. P. 133-161. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-02786-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02786-5_7).

## Оказывает ли влияние вечная мерзлота на вертикальное распределение коллембол в восточно-европейских тундрах?

*Таскаева А.А., Лантева Е.М.*

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия*

*e-mail: taskaeva@ib.komisc.ru*

Важность понимания пространственной неоднородности почвенных организмов, от микро- до макромасштаба и основополагающих движущих факторов неоднократно обсуждалась [Ettema and Wardle, 2002]. Сообщества почвенных организмов распределены как по горизонтали, так и по вертикали. Несмотря на хорошее понимание стратификации свойств самой почвы, вертикальное распределение почвенной биоты часто игнорируется [Berg, 2012]. Такая недооценка не позволяет обнаружить связь между уменьшением содержания органического вещества и плотности фауны и микробов с глубиной. Хотя известно, что органическое вещество почвы является основным источником энергии для почвенной биоты [Rice, 2005].

Восточно-европейские тундры, характеризующиеся распространением вечной мерзлоты, являются удобным объектом для изучения вертикального распределения почвенной фауны, в том числе коллембол. Объектом исследования послужили два типа тундровых почв с разным уровнем залегания многолетней мерзлоты (ММП): (1) торфяно-глеезем, мохово-лишайниковая тундра (мерзлота на глубине 70-90 см); (2) глеезем криометаморфический, ивняково-ерниковая тундра (мерзлота на глубине 160- 180 см). Почвы формируются в одинаковых климатических условиях, но, в силу специфики расположения в рельефе и уровню залегания ММП, различаются по температурному режиму. Нами выдвинуто предположение о том, что в почве с более глубоким уровнем залегания ММП и более благоприятными условиями температурного режима численность и разнообразие ногохвосток будет выше.

Результаты наших исследований показали, что численность и видовое богатство коллембол в обоих типах почвы при общей закономерности их уменьшения вниз по профилю, достоверно не изменяется и снижается только в горизонтах T<sub>2</sub> и Bg. Значимые отличия в плотности и богатстве сообществ коллембол в рассмотренных почвах выявлены только в горизонте Bg (табл. 1). Полученные данные свидетельствуют о том, что глубина залегания мерзлоты в почвах тундры оказывает влияние на вертикальное распределение коллембол – в торфяно-глееземах население коллембол «прижато» к верхним слоям почвы, в глееземах криометаморфических наблюдается более активная колонизация коллемболами нижних слоев органогенного (T<sub>2</sub>) и минерального (Bg) горизонтов, по сравнению с торфяно-глееземом.

Тип почвы	Горизонт почвы			
	Слой живых мхов	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	Bg
Численность (тыс. экз./м <sup>2</sup> )				
Торфяно-глеезем	23.6 ± 5.2 <sup>a</sup>	19.6 ± 3.2 <sup>a</sup>	3.0 ± 0.4 <sup>b</sup>	0.5 ± 0.1 <sup>c</sup>
Глеезем криометаморфический	14.9 ± 2.3 <sup>a</sup>	14.1 ± 3.0 <sup>ab</sup>	7.7 ± 2.2 <sup>b</sup>	3.3 ± 0.9 <sup>c</sup>
Видовое богатство (S)				
Торфяно-глеезем	5.4 ± 0.4 <sup>a</sup>	6.1 ± 0.4 <sup>a</sup>	3.0 ± 0.3 <sup>b</sup>	0.7 ± 0.2 <sup>c</sup>
Глеезем криометаморфический	6.4 ± 0.5 <sup>a</sup>	5.6 ± 0.6 <sup>ab</sup>	4.0 ± 0.6 <sup>b</sup>	2.5 ± 0.3 <sup>c</sup>

**Табл.1.** Население коллембол в различных горизонтах тундровых почв.

**БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Авторы выражают благодарность А.А. Кудрину, Е.М. Перминовой и Ю.В. Холопову за помощь при отборе почвенных образцов. Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 122040600025-2, 122040600023-8).

*Berg M.P.* Patterns of biodiversity at fine and small spatial scales // *Soil Ecol. Ecosyst. Serv.*, 2012. 136e152 DOI: 10.1093/acprof:oso/9780199575923.003.0014.

*Ettema C.H., Wardle D.A.* Spatial soil ecology // *Trends Ecol. Evol.*, 2002, Vol. 17. DOI: 10.1016/S0169-5347(02)02496-5.

*Rice C.W.* Carbon cycle in soil: dynamics and management // *Encycl. Soils Environ.* 2005. 164e170. DOI: 10.1016/b0-12-348530-4/00183-1.

## Влияние температуры на численность культивируемого аэробного бактериального сообщества и содержание ДНК в тундровых и маршевых почвах Севера Якутии

*Ходжаева А.К., Спирина Е.В., Губин С.В.*

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пуццино, Россия  
e-mail: khodzhaeva@pbcras.ru*

Арктические экосистемы и, в частности, береговая зона северных морей как одни из наиболее экологически важных, уязвимых и мало изученных требуют особого внимания. Изучение численности, структуры, разнообразия, стабильности микробных сообществ и их трансформаций является важным для понимания преобразований этих экосистем особенно в связи с возрастающей антропогенной нагрузкой и возможными изменениями климата. Микробиологическое исследование, проводили на образцах, отобранных из профилей двух рядов мерзлотных почв. Первый ряд включал почвы арктических тундр, удаленные от моря на расстоянии 0.5-1 км, сформированные на позднеплейстоценовой возвышенности (криозем и торфяно-глееземы мерзлотные). Второй ряд представлен маршевыми почвами, сформированными на участках побережий, регулярно затопляемых морскими нагонными и приливными водами (слаборазвитые маршевые слоистые глеевые засоленные мерзлотные и маршевая торфяно-глеевая засоленная мерзлотная). Цель работы – изучить влияние температуры инкубирования на численность аэробных гетеротрофных бактерий и содержание суммарной геномной ДНК в разных типах почв формирующихся, в суровых климатических условиях, при близком залегании многолетней мерзлоты и различных режимах затопления и засоления. В задачи исследования входило: определение содержания суммарной геномной ДНК в образцах хранившихся при 4°C и после их инкубирования при 20°C; определение численности аэробных гетеротрофных бактерий по количеству КОЕ/г в высевах на агаризованные питательные среды и при двух температурах инкубирования (4 и 20°C); определение филогенетического разнообразия культивируемых на морском агаре аэробных гетеротрофов двух рядов почв.

Почвенные образцы отбирали с соблюдением требований стерильности и до начала работ хранили при 4°C. Исследовано 25 почвенных образцов из 6-ти разрезов, заложенных на побережье Восточно-Сибирского моря в месте впадения в него р. Б. Чукочья. Содержание общего органического углерода ( $C_{орг}$ ) в образцах криозема и торфяно-глееземов варьировало в пределах от 0.24 до 41% с максимумами в верхних органогенных горизонтах. В ряду маршевых почв содержанием  $C_{орг}$  также значительно изменялось по профилю с максимумами в верхних органогенных горизонтах и обогащенных детритом слоях (до 32%) и минимумами в минеральных (<1%). Исключением стала слаборазвитая маршевая слоистая глеевая засоленная мерзлотная почва, в профиле которой, содержание  $C_{орг}$  изменялось незначительно (1-3%). Содержание общего азота ( $N_{общ}$ ) в образцах криозема и торфяно-глееземов варьировало от 0.02 до 2%, отношение  $C : N$ , изменялось в широких пределах от 8 до 50. Содержание  $N_{общ}$  в образцах из профилей маршевых почв варьировало от 0.1 до 2%, отношение  $C : N$  – от 11 до 21. Таким образом, привнос с морскими водами свежего органического материала, в большей степени обогащенного азотом, отличает маршевые почвы от криоземов и торфяно-глееземов. Величина  $pH_{H_2O}$  почвенных суспензий исследуемых образцов изменялась от кислой до нейтральной. Содержание и состав легкорастворимых солей определяли только в образцах маршевых почв, где величина плотного остатка составляла 0.2-4% и, таким образом, степень засоления образцов изменялась от незасоленных до сильнозасоленных. Химизм засоления – хлоридно-сульфатный с наиболее высокой концентрацией солей в верхних органогенных горизонтах и обогащенных детритом слоях.

Для определения влияния температуры на содержание суммарной геномной ДНК проводили экстракцию из почвенных образцов хранившихся при 4°C и после их



инкубирования в течении 14 суток при температуре 20°C. Содержание ДНК в образцах, хранившихся при температуре 4°C, варьировало от 0.5 до 101 мкг/г в криоземе и торфяно-глееземах и от 0.7 до 47 мкг/г в маршевых почвах, с максимумами в верхних органогенных и органоминеральных горизонтах, и обогащенных детритом слоях. Самым высоким содержанием ДНК (1.5-101 мкг/г) характеризовался профиль торфяно-глеевой почвы. Инкубирование образцов при 20°C в среднем в 2 раза увеличило содержание ДНК как в тундровых почвах, так и в маршевых. Численность аэробных, гетеротрофных бактерий, выявляемых на универсальной для почвенных микроорганизмов питательной среде и инкубировании при 4°C варьировала от  $9 \times 10^4$  до  $6 \times 10^8$  КОЕ/г при прямых высевах из криозема и торфяно-глееземов, и от  $2 \times 10^6$  до  $7 \times 10^8$  – из маршевых почв, уменьшаясь с глубиной. Повышение температуры инкубирования до 20°C в среднем в 10 раз увеличило количество выявляемых КОЕ/г в высевах из криозема и торфяно-глееземов, и только в 2 раза из маршевых. Высевы из образцов тундровых почв на морской агар Зобелля и инкубирование при 4°C дало положительные результаты только для криозема и верхнего органогенного горизонта торфяно-глеезема, где количество КОЕ/г определили в пределах от  $1 \times 10^5$  до  $6 \times 10^7$  и которое с повышением температуры до 20°C возросло в 6 раз. Численность аэробных, гетеротрофных бактерий, выявляемых на морском агаре в высевах из маршевых почв и инкубировании при 4°C составляла  $2 \times 10^4$  -  $6 \times 10^8$  КОЕ/г, но с повышением температуры до 20°C уменьшилась в 2 раза. Таким образом, инкубирование почвенных образцов при 20°C в среднем в 2 раза увеличило концентрацию экстрагируемой суммарной геномной ДНК (мкг/г) вне зависимости от условий формирования почв и глубины отбора образцов. Тогда как, влияние температуры инкубирования на численность культивируемых аэробов в значительной степени зависело от условий формирования этих почв, глубины отбора образцов и питательной среды, используемой для их выявления.

Для оценки влияния морских вод на филогенетическое разнообразие аэробной гетеротрофной части бактерий исследуемых почв, выделенные на морском агаре Зобелля штаммы были идентифицированы по результатам анализа фрагмента гена 16S рРНК. Выделено 12 штаммов, являющихся представителями 10 родов, относящихся к 2 филумам: *Actinomycetota* (30%) и *Pseudomonadota* (70%). Представители родов *Arthrobacter* и *Pseudarthrobacter* (облигатные аэробы, часто обнаруживаемые в почвах, морской воде, ледниковом и водном иле и др.) были изолированы из криозема и торфяно-глеезема. Представитель рода *Brevundimonas*, подвижных облигатных аэробов, часто обнаруживаемых в почвах, изолирован из торфяно-глеезема. Представители родов *Devosia*, *Leifsonia*, *Loktanella*, *Rhodanobacter*, *Sodalis*, *Sphingopyxis*, *Sphingorhabdus* (в большинстве своем облигатные аэробы, обнаруживаемые в почвах, пресных и морских водах, эктопаразитах водных млекопитающих и др.), были изолированы из маршевых почв. Восемь из двенадцати штаммов имеют высокий процент подобия (>99%) с ранее описанными арктическими и антарктическими изолятами.

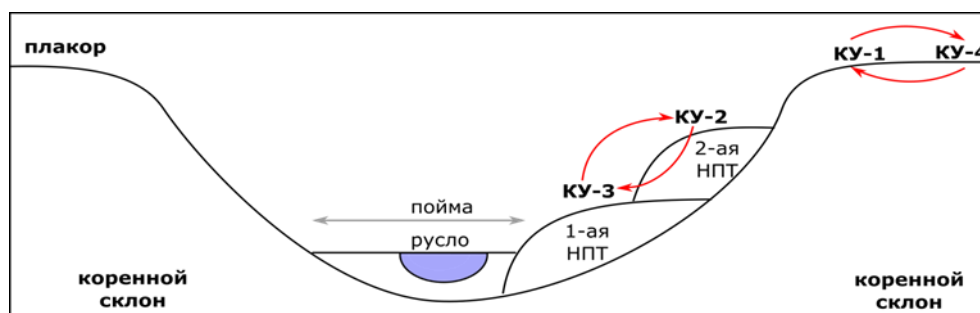
## Оценка устойчивости сообществ почвообитающих раковинных амёб тундровых экосистем по результатам трансплантационных экспериментов

Чулей А.Д.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*  
*e-mail: Artem957148@yandex.ru*

Арктические экосистемы особенно чувствительны к глобальным климатическим изменениям. Для того, чтобы оценить степень воздействия изменения климата на арктические природные сообщества важно рассматривать наблюдаемые тенденции на уровне отдельных групп организмов. Удобным объектом в подобных исследованиях оказываются простейшие, составляющие основу пищевой сети арктических экосистем [Biasi et al., 2008]. В качестве модельного объекта были выбраны раковинные амёбы. Наличие твёрдой раковинки, длительно сохраняющейся в почве, даёт информацию не только о таксономическом статусе организма, но и о составе жизненных форм и экологических групп [Бобров и др., 2013]. Цель работы – определить влияние природных микроклиматических особенностей (температура и тип растительного сообщества) на почвенные сообщества раковинных амёб и оценить их устойчивость к этим изменениям.

Для выявления влияния микроклимата на сообщества амёб были проведены трансплантационные эксперименты (перенос участков почвы с изучаемыми организмами из одного биотопа в другой) на территории Большеземельской тундры (БЗТ) на северо-востоке Европейской части России. Были выбраны две пары участков, приуроченных к разным ландшафтным условиям. Все участки характеризовались различными растительными ассоциациями с контрастными температурными условиями. Первая пара участков была представлена мелкокарликовой мохово-лишайниковой тундрой и кустарничковой лишайниково-моховой тундрой. Вторая пара участков для пересадки была представлена крупной кустарничково-моховой тундрой и луговой ассоциацией, заросшей ивой (рис. 1).

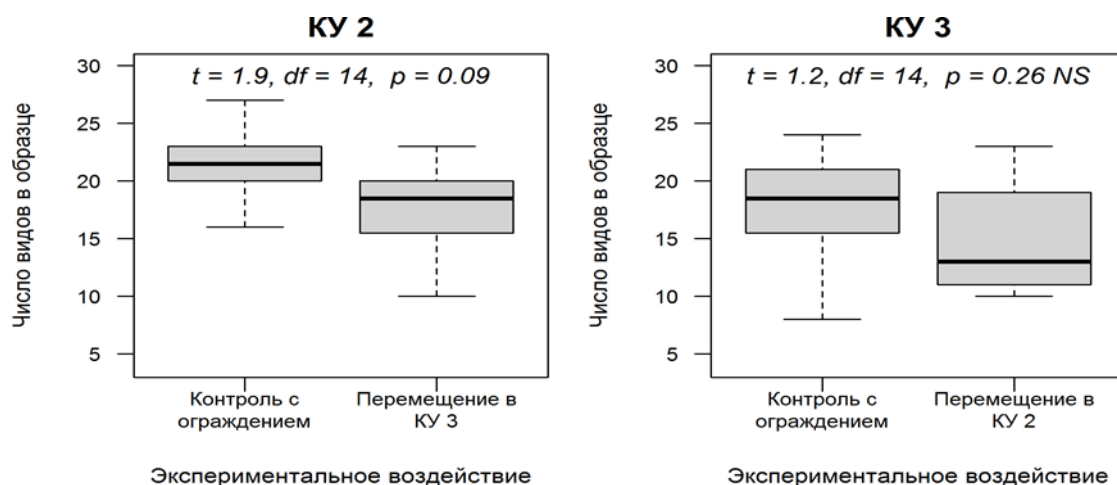


**Рис. 1.** Расположение контрольных площадок в рельефе:  
первая пара Контрольная площадка 2 (кустарничково-моховая тундра)  
и Контрольная площадка 3 (кустарничково-лишайниково-моховая тундра);  
вторая пара Контрольная площадка 1 (крупнокустарничково-моховая тундра)  
и Контрольная площадка 4 (луговая растительность).  
НПТ – надпойменная терраса.

Определение обилия и видовой структуры сообществ раковинных амёб производилось методом светового микроскопирования. Предварительно была произведена лабораторная обработка образцов почвы и торфа, в соответствии со стандартной методикой, в основе которой лежит фильтрование и концентрирование водных суспензий [Мазей, Ембулаева, 2009]. Статистическая обработка полученных результатов осуществлялась в программе R.

Всего было изучено 94 пробы, в которых обнаружено 68 видов и подвидов раковинных амёб, принадлежащих к 22 родам. Анализ видовой структуры сообществ

раковинных амёб выявил статистически значимые различия только в случае перемещения выборок из мелкоерниковых тундр в кустарниковые тундры. Результаты ординации сообществ методом главных компонент выявили основные отличия в видовой структуре между крупнокарликовой и луговой тундрой, с одной стороны, и мелкоерниковой и кустарничковой тундрой, с другой. Вторая главная компонента была преимущественно связана с различиями между участками и экспериментальными методами (рис. 2).



**Рис. 2.** Результат воздействия (критерий Стьюдента) экспериментального перемещения на среднее число видов в образце по сравнению с огороженным контролем (КУ 2 – мелкоерниковая кустарничково-моховая тундра, КУ 3 – кустарничковая лишайниково-моховая тундра).

Таким образом, устойчивость сообществ раковинных амёб оказалась в значительной степени связана с типом растительного сообщества только в одном из экспериментов. При этом основные изменения в сообществах раковинных амёб связаны с исчезновением или появлением малочисленных видов. Возможно, при перемещении снижение устойчивости сообщества и изменение условий среды приводят к изменению нишевой структуры.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Автор выражает благодарность А.А. Таскаевой и А.А. Кудрину (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН) за проведение опыта по трансплантации в Большеземельской тундре; В.А. Чернышову и А.А. Комарову (Пензенский государственный университет) за помощь в ризоподном анализе; Ю.А. Мазею и А.Н. Цыганову (МГУ им. М.В. Ломоносова) за консультации на всех этапах работы.

*Biasi C., Meyer H., Rusalimova O., Hämmerle R., Kaiser C., Baranyi C., Richter A.* Initial effects of experimental warming on carbon exchange rates, plant growth and microbial dynamics of a lichen-rich dwarf shrub tundra in Siberia // *Plant and Soil*. 2008. V. 307. P. 191-205.

*Bobrov, A. A., Wetterich, S., Beermann, F., Schneider, A., Kokhanova, L., Schirrmeyer, L., Herzsuh, U.* Testate amoebae and environmental features of polygon tundra in the Indigirka lowland (East Siberia) // *Polar Biology*. – 2013. – Т. 36. – С. 857-870.

Мазей Ю.А., Ембулаева Е.А. Изменение сообществ почвообитающих раковинных амёб вдоль лесостепного градиента в среднем Поволжье. *Аридные экосистемы*, Т. 15, №1.

## Сообщества инфузорий в почвах береговой зоны приморских низменностей Якутии

*Шатилович А.В.<sup>1,2</sup>, Губин С.В.<sup>1</sup>, Лупачев А.В.<sup>1</sup>, Федоров-Давыдов Д.Г.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*

<sup>2</sup>*Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: nastya.shat@rambler.ru*

Приморские экосистемы Арктики мало изучены и подвержены значительной антропогенной нагрузке. Почвы береговой зоны, формирующиеся под влиянием моря, характеризуются высокой вариабельностью физико-химических условий, создавая на градиентах факторов разнообразные местообитания почвенной микрофауны. Для лучшего понимания функционирования приморских арктических экосистем исследовали разнообразие и структуру сообществ инфузорий в криогенных почвах береговой зоны приморских низменностей севера Якутии.

Исследования проводили в подзоне арктической тундры на побережье морей Восточно-Сибирского и Лаптева. Пробные площадки располагались в районе устья реки Б.Чукочья (мыс Чукочий) и в низовьях реки Лена (п-в Быковский) и охватывали коренной берег с маритимными почвами на водораздельных поверхностях, а также территорию, прилегающую к береговой линии моря и регулярно или периодически затопляемую приливно-нагонными морскими водами (марши и ватты). На дренированных едомных поверхностях изучали грубогумусированные криоземы и глееземы, типичные для нанопolygonальных тундр севера Якутии. В пределах береговой зоны исследовали наиболее обводненные и засоленные почвы каменистых литоралей, граничащих с морем и регулярно затопляемых. Мощность слоя сезонного протаивания в пределах этой зоны 40-55 см, минерализация воды в профиле 4,4‰. Почвы маршей, находящихся на некотором удалении от моря, характеризуются меньшей степенью засоления, минерализация воды в профиле от 4 до 0,2‰. Для этих почв характерна слабокислая реакция и восстановительная реакция по всему профилю [Губин, Лупачев, 2022].

Проанализированы пробы из различных генетических горизонтов 9 профилей криозёмов и 16 профилей почв маршей и ватт. В составе ценозов, характерных для почв прибрежной зоны арктической тундры, обнаружено 45 видов инфузорий. Отмечены различия в видовой структуре исследуемых сообществ – максимальное видовое разнообразие отмечено для засоленных почв, что объясняется присутствием морских и галотолерантных видов. Однако, посев проб на морские культуральные среды показал отсутствие галофильных видов в сообществах маритимных почв. Значительную часть таксоценоза составляют эврибионтные виды. Показано, что степень засоленности и кислотности прибрежных почв заметно влияет на формирование разнообразия и структуры сообществ почвенных инфузорий береговой зоны.

*Губин С.В., Лупачев А.В. Почвы аккумулятивных берегов Восточно-Сибирского моря // Почвоведение.2022. № 9, с.1-13. DOI: 10.31857/S0032180X22090076.*

## Экологические особенности микробиома почв центрально и восточной части Земли Франца-Иосифа

*Яковлева С.А.<sup>1</sup>, Никитин Д.А.<sup>2,4</sup>, Лысак Л.В.<sup>1</sup>, Евграфова С.Ю.,<sup>3</sup> Усова А.П.<sup>4</sup>, Мергелов Н.С.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия*

<sup>2</sup>*Почвенный институт им. В.В. Докучаева Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*

<sup>4</sup>*Институт географии РАН, Москва, Россия*

*e-mail: dimnik90@mail.ru*

Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) – крайняя северная точка на суше Европы и России, состоящая, из 192 островов, практически каждый из которых покрыты ледниками, определяющими растительный и почвенный покров [Горячкин и др., 2017]. Климат архипелага – морской арктический с околонулевыми летними и низкими отрицательными (до  $-25^{\circ}\text{C}$ ) зимними температурами. Почвы архипелага относятся к криоземам, литоземам, псаммоземам, пелоземам и серогумусовым мерзлотным почвам [Горячкин и др., 2017; Никитин и др., 2020]. Растительный покров ЗФИ относят к арктическим пустыням, пустошам и тундро-пустошам. Почвенные микроорганизмы определяют биологическую активность ландшафтов Арктики и выполняет комплекс экологических функций [Flossco et al., 2019].

Цель работы – оценка структуры биомассы микробиоты, а также количества КОЕ и таксономического разнообразия культивируемых микромицетов в почвах ЗФИ.

Исследованные почвы расположены на островах Грэм Бэлл, Земля Вильчека, Матильды и Хейса и относятся к глееземам мерзлотным/Stagnic Follic Cryosol, псаммозем глееватым мерзлотный/Turbic Cryosol (Arenic), псаммозем грубогумусовым мерзлотным щебнистым/Turbic Cryosol (Arenic), пелозем/Leptic Cryosols (Loamic, Humic) псаммоземам стратифицированным щебнистым/Haplic Cryosol (Arenic), криоземам сильнощебнистым/(Oxyaquic Cryosols (Loamic, Humic)), пелозем гумусовым глееватым мерзлотным/Oxyaquic Turbic Cryosol (Loamic, Humic). Образцы для микробиологических исследований отобраны методом усреднения пяти единичных проб с возможными мерами по предотвращению контаминаций и хранились в стерильных емкостях при температуре  $-18^{\circ}\text{C}$ . Физические и химические параметры почвы определяли в воздушно-сухих образцах.

Биомассу грибов и прокариот определяли методом люминесцентной микроскопии. Численность и таксономический состав культивируемых микроскопических грибов и бактерий определяли методом микробиологического посева.

Биомасса грибов изменялась от 0.032 до 0.617 мг/г почвы, снижаясь от органогенных к минеральным горизонтам. Однако профиль псаммозем глееватый мерзлотный о.Хейса характеризовался иным распределением биомассы грибов с максимумом в подповерхностном слое. Длина мицелия изменялась от 4.1 до 579.4 м/г почвы, уменьшаясь сверху вниз по профилям. Отдельные надмерзлотные горизонты не содержали гиф грибов. Доля мицелия в общей грибной биомассе существенно уменьшалась от поверхностных горизонтов (28-53%) к глубинным (0-3%). Диаметр большинства (63-76%) гиф не превышал 3 мкм. Для минеральных горизонтов типично преобладание мелких (2-3 мкм) спор и дрожжей, численность которых не превышала  $10^3$ - $10^4$  клеток/г почвы. Крупные споры диаметром 5 мкм выявлены (до  $10^2$  клеток/г почвы) исключительно в органогенных горизонтах. Около 71% пропагул округлой формы с гладкой поверхностью, 21% округлые и шероховатые, 5% – овальные с гладкой поверхностью, 3% овальные с неровной поверхностью. Численность прокариот варьировала от  $1.2 \times 10^8$  до  $3.8 \times 10^9$  клеток/г почвы, уменьшаясь от поверхностных слоев к глубинным. Мицелий актиномицетов отсутствовал в большинстве почв, однако в некоторых оторфованных горизонтах его длина достигала 201 м/г почвы.

При  $+25^{\circ}\text{C}$  выявлено 27 родов микромицетов, численность которых варьировала от  $7.0 \times 10^2$  до  $1.1 \times 10^4$  КОЕ/г почвы, снижаясь от поверхностных органогенных горизонтов к глубинным. Однако, в профиле пелозема, псаммозема грубогумусового мерзлотного

щебнистого о. Хейса, а также в глееземе мерзлотном о. Грэм Бэлл отмечен локальный максимум количества КОЕ микроскопических грибов в надмерзлотном горизонте. Профиль пелозема гумусового глееватого мерзлотного о. Земля Вильчека имел реверсивный тип распределения числа КОЕ по горизонтам. Причем 9 выделенных родов (*Acremonium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Botrytis*, *Cladosporium*, *Exophiala*, *Neosartorya*, *Teberdinia*) не были выявлены при низкой температуре (+5°C). При +5°C выявлено 26 родов микромицетов, численность которых варьировала от

$3.7 \times 10^2$  до  $8.1 \times 10^3$  КОЕ/г почвы, снижаясь от поверхностных органогенных горизонтов к глубинным, причем 9 из них (*Cosmospora*, *Cryptococcus*, *Glaciozyma*, *Goffeauzyma*, *Leucosporidium*, *Mrakia*, *Phialocephala*, *Phenoliferia*, *Pochonia*) не были выявлены при повышенной (+25°C) температуре. Численность культивируемых бактерий составляла от  $7.0 \times 10^4$  до  $1.0 \times 10^7$  КОЕ/г почвы. Доминировали бактерии родов *Arthrobacter*, *Rhodococcus* и *Proteobacteria*; субдоминантами выступал роды *Bacillus* и *Mucococcus*; минорные компоненты включали в себя представителей родов *Cytophaga*, *Streptomyces*.

Несмотря на небольшую площадь территории, для ЗФИ характерна существенная пестрота почвенного покрова. Суровые климатические условия ЗФИ не приводят к значительному лимитированию качественных и количественных показателей почвенных микроорганизмов, которые могут достигать относительно больших значений в органогенных горизонтах. Это может свидетельствовать о высоком потенциале биологической активности почв Высокой Арктики в целом.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 21-17-00163.

*Flocco C.G., Mac Cormack W.P., Smalla K.* Antarctic soil microbial communities in a changing environment: their contributions to the sustainability of Antarctic ecosystems and the bioremediation of anthropogenic pollution / The ecological role of microorganisms in the Antarctic environment. 2019. P. 133-161. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-02786-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02786-5_7).

*Горячкин С.В., Долгих А.В., Мергелов Н.С.* Почвы островов Земли Франца Иосифа: география, морфогенетические особенности, классификация и роль в углеродном цикле // Комплексная научно-образовательная экспедиция «Арктический плавучий университет – 2017». (Электронный ресурс): материалы экспедиции. Архангельск: КИРА. 2017. С. 15–36.

*Никитин, Д.А., Лысак, Л.В., Мергелов, Н.С., Долгих, А.В., Зазовская, Э.П., & Горячкин, С.В.* Микробная биомасса, запасы углерода и эмиссия CO<sub>2</sub> в почвах Земли Франца-Иосифа: высокоарктические тундры или полярные пустыни? Почвоведение. 2020. № 4. С. 444-462.

## Use of testate amoebae as indicators of surface moisture in permafrost bogs (Central Siberian Plateau)

Xiuyuan Gu

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

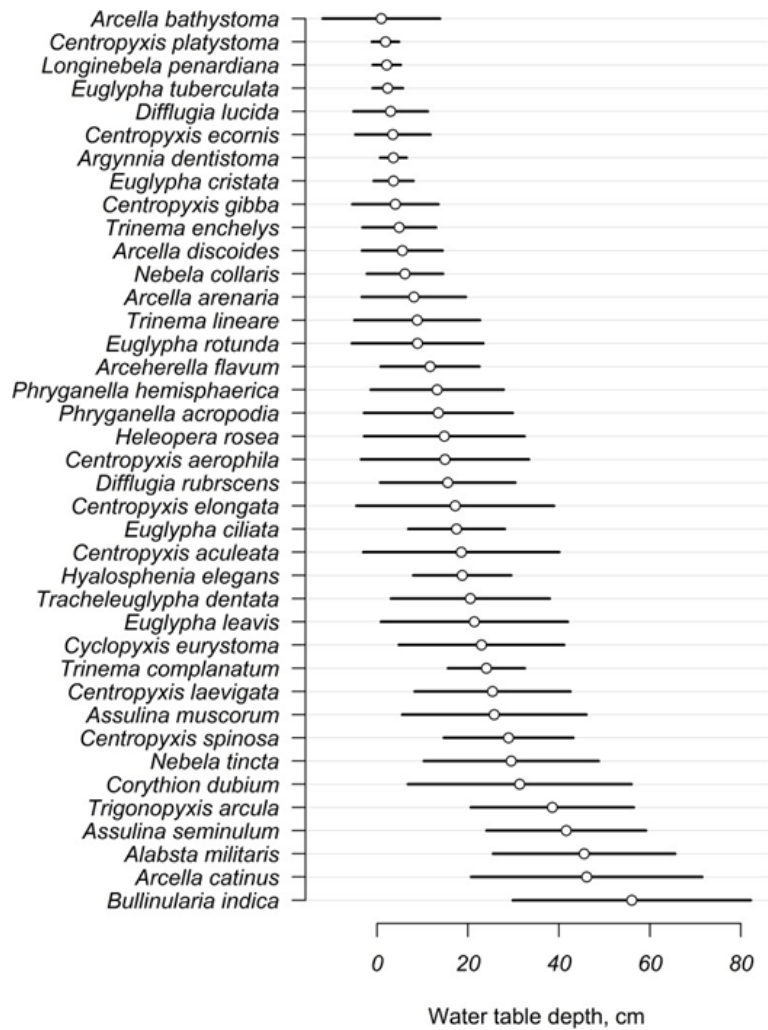
e-mail: gxy641948749@126.com

Testate amoebae are unicellular eukaryotic microbes which have been valued for their functional significance and application as an indicator of environmental conditions, especially in mire ecosystems. Research on testate amoeba has been increasing dramatically in recent years, but there are still large parts of the world where it has been little studied. The aim of this study is to investigate the species composition of testate amoeba assemblages in permafrost soils in the Putorana Plateau (Central Siberia) and estimate their indicator value for surface moisture.

In total, 53 moss surface samples (~10 cm<sup>3</sup>) were collected in various mire ecosystems located on the shore of Lake Lama (Kransoyarsk Krai, Russia). At every location water table depth (WTD, cm) was measured in relation to the mire surface as a proxy for surface wetness. In laboratory, samples were prepared for testate amoeba analysis according to the standard protocol [Hendon, Charman, 1997]. A drop of the concentrate was placed on a microscopic slide, mixed with glycerol and inspected at 200x magnification, all encountered testate amoebae were identified and counted.

The water table depths values varied from 0 to 70 cm, with approximated half of the samples collected from wet biotopes with WTD less than 10 cm. In total, 6003 individuals of testate amoebae were found and identified. They belong to 62 taxa and 26 genera. The most abundant taxa (with the relative abundance to the total counts greater than 5%) were *Arceherella flavum* (9.5%), *Trinema enchelys* (7.1%), *Trinema lineare* (6.6%), *Nebela tinctoria* (6.5%), *Assulina muscorum* (6.3%), *Cyclopyxis eurystoma* (6.1%) and *Phryganella hemisphaerica* (5.9%). The most common species (with the occurrence greater than 45 % of samples) were *Assulina muscorum* (56.6%), *Trinema lineare* (56.6%), *Cyclopyxis eurystoma* (52.8%), *Centropyxis aerophila* (49.1%), *Euglypha rotunda* (49.1%), *Euglypha leavis* (45.3%) and *Nebela tinctoria* (45.3%). Seven species were encountered in one sample only (the maximal relative abundance per sample was less than 0.4%). The number of testate amoeba taxa per sample varied from 1 to 25 with the mean value of  $10.9 \pm 6.02$  (SD; n = 53). Overall, the species composition of testate amoeba assemblages was diverse and typical for *Sphagnum*-dominated mires.

The optima and tolerance of moss-dwelling testate amoeba taxa in relation to the surface wetness are shown (Fig. 1). Among the observed taxa, the most xerophilic were *Bullinularia indica*, *Arcella catinus*, *Alabstra militaris*, *Assulina seminulum*, *Trigonopyxis arcuata*, *Corythion dubium*. The most hydrophilic were *Arcella bathystoma*, *Centropyxis platystoma*, *Longinebela penardiana*, *Euglypha tuberculata*, *Diffflugia lucida*, *Centropyxis ecornis*. These taxa can be used as indicators of surface wetness in the study region.



**Fig. 1.** The optima and tolerance of moss-dwelling testate amoeba taxa (only species observed in five or more samples are shown) in relation to the surface wetness measured as water table depth.

**ACKNOWLEDGEMENTS:**

I am very grateful to Dr. Andrey N. Tsyganov and Dr. Yuri A. Mazei for their guidance and support. In addition, I would like to thank the China Scholarship Council for their financial support of my PhD program.

*Hendon, D., and Charman, D. J.* The preparation of testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) samples from peat // *The Holocene*, 1997, Vol. 7, No 2, pp. 199–205.



## СЕКЦИЯ 9.

# КРУГОВОРОТ ЭЛЕМЕНТОВ И СОЕДИНЕНИЙ В МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВАХ

### Органическое вещество почв ЯНАО в районах с различной антропогенной нагрузкой

*Алексеев И.И.<sup>1</sup>, Шенин А.Н.<sup>2</sup>, Краев Г.Н.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Россия  
e-mail: alekseevivan95@gmail.com*

Мерзлотные почвы являются важной частью полярных экосистем и играют ключевую роль в накоплении, трансформации, перераспределении и миграции различных химических соединений и элементов в ландшафте [Горячкин, 2010]. Изучение почвенного покрова Арктики представляет собой важную задачу в силу недостаточной изученности таксономического, функционального разнообразия почв этого региона, его роли в функционировании экосистем и степени его изменения под действием антропогенного фактора. Почвы полярных регионов до недавнего времени чаще всего рассматривались с позиций оценки биоклиматических параметров, тогда как литологические особенности часто не принимались в расчет. Качественные и количественные исследования органического вещества почвы имеют решающее значение, поскольку огромное количество органического углерода, хранящегося в мерзлотных почвах, может подвергнуться высвобождению, вызванному увеличением доступности органических соединений растительного происхождения и повышением температуры.

Наша работа направлена на оценку запасов органического углерода, оценку степени гумификации органопротилей почв (по показателю Сгк/Сфк), характеристику молекулярной организации органического вещества почвы, определение его потенциальной уязвимости в различных районах Ямало-Ненецкого автономного округа (районы с различной антропогенной нагрузкой в окрестностях пос. Новый Порт, Ныда, г. Новый Уренгой, г. Салехард).

Наблюдаемое в исследованных почвах преобладание углерода фульвокислот, наряду с преобладанием низкомолекулярных фрагментов во фракциях фульвокислот, указывает на повышенные риски минерализации в системе гуминовых веществ полярных почв в условиях дальнейшего потепления арктического климата. Хотя во всех исследованных образцах соотношение Сгк:Сфк было меньше 1, стоит отметить, что наиболее широкое (0,80) отношение Сгк:Сфк характерно для грубогумусовой глееватой среднесуглинистой почвы на многолетнемерзлых суглинках (лесотундра в окрестностях г. Новый Уренгой), что свидетельствует о наиболее активной гумификации в условиях поступления в почву растительного опада, обогащенного лигнинсодержащими фрагментами именно в лесотундрах. Соотношение Сгк:Сфк может быть использовано для прямой оценки уровней стабильности органического вещества почвы, а также рисков его деградации и минерализации. В свою очередь, наиболее низкие показатели отношения Сгк:Сфк характерны для торфяных почв, что связано с консервацией и замедленной гумификацией растительных остатков. Это еще раз демонстрирует важность исследований почвенного органического вещества и его состава, особенно в мерзлотных почвах, поскольку они

являются одним из основных источников нестабильного почвенного органического углерода [Hugelius, Kuhry, 2009].

Твердотельная  $^{13}\text{C}$ -ЯМР спектроскопия гуминовых кислот, выделенных согласно общепринятой методике International Humic Substances Society (IHSS, 1981), показала низкое количество ароматических фрагментов в большинстве исследованных почв. Все изученные почвы характеризуются преобладанием алифатических структур, а также углеводов, полисахаридов, простых эфиров и аминокислот. Было обнаружено, что все исследованные гуминовые кислоты имеют наиболее интенсивные пики в районе 175 ppm, что соответствует карбоксильной С-группе. Это объясняет более интенсивную гумификацию в мелкоземы этих почв вместе с образованием более развитой периферийной алифатической части гуминовых кислот. Результаты, полученные с помощью  $^{13}\text{C}$ -ЯМР спектроскопии, выявили лишь небольшие различия в молекулярном составе гуминовых кислот по географическому градиенту исследуемых участков. Это может быть связано с однородным составом растительности и схожими климатическими условиями. В некоторых предыдущих исследованиях было показано, что арктические почвы могут содержать более стабильные ароматические компоненты по сравнению с алифатическими, но мы не обнаружили такой особенности в изученных почвах. Таким образом, можно подчеркнуть необходимость проведения дополнительных исследований в различных секторах Арктики для сбора дополнительных данных о молекулярном составе органического вещества почвы и его изменчивости в зависимости от биогеоклиматогенных градиентов. Преобладание алифатических форм углерода в изученных нами гуминовых кислотах также свидетельствует о ранних стадиях процесса гумификации в изученных почвах. Это согласуется с результатами предыдущих исследований (хотя и эпизодических) в различных секторах Сибири.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Авторы выражают благодарность Научному центру изучения Арктики (г. Салехард, г. Надым) за логистическую поддержку экспедиционных работ.

*Горячкин С.В.* Почвенный покров севера (структура, генезис, экология, эволюция). Москва: ГЕОС, 2010. 414 с.  
*Hugelius, G.; Kuhry, P.* Landscape partitioning and environmental gradient analyses of soil organic carbon in a permafrost environment. // *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2009, 23, GB3006. *IHSS—International Humic Substances Society*. Outline of Extraction Procedures, Distributed to the Members of International Humic Substances Society; International Humic Substances Society: Saint Paul, MN, USA, 1981.

## Компоненты углеродного цикла почв экосистем Арктики и Субарктики: трансекта от арктической пустыни до южной тундры

Бобрик А.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
e-mail: ann-bobrik@yandex.ru

Исследование направлено на решение фундаментальных проблем почвоведения и экологии, связанных с оценкой углеродного баланса в почвах и экосистемах Арктики и Субарктики, а также их функционирования в условиях меняющегося климата и возрастающей антропогенной нагрузки.

Цель работы – оценка пространственного распределения компонентов углеродного цикла (эмиссия CO<sub>2</sub>, содержание лабильного и микробного углерода) в почвах типичных экосистем арктической пустыни и южной тундры.

Исследования проводились в пик вегетационного сезона в типичных экосистемах арктической пустыни (арх. Земля Франца-Иосифа на о. Хейса (80°37 N, 58°03 E) и о. Гукера (80°20 N, 52°46 E), июнь 2021), южной тундры (п-ов Тазовский; 67°48 N, 76°69 E, август 2016; респ. Коми, г.о. Воркута; 67°38 N, 64°14 E, июль 2022). На объектах исследования были заложены мониторинговые площадки. Площадки мониторинга за счет возможности проведения исследования по регулярной сетке и значительному объему повторностей являются оптимальными для оценки пространственной вариабельности компонентов углеродного цикла почв. На мониторинговых площадках проведено определение параметров гидротермического режима почв, мощности сезонно-талого слоя, эмиссии углекислого газа, описание почвенного и растительного покровов. В лабораторных условиях проведено определение содержания экстрагируемого углерода почв и углерода микробной биомассы почв.

В результате выполнения работ получена общая характеристика факторов среды и компонентов углеродного цикла почв, оценена их пространственная вариабельность и взаимосвязь, также определено, какие факторы среды и в какой степени оказывают влияние на эмиссию углерода почв.

Установлено, что все изученные факторы среды в экосистемах южной тундры на северо-востоке Русской равнины и в Западной Сибири характеризуются высокой пространственной вариабельностью, что обусловлено неоднородным характером почвенного и растительного покровов, особенностями микрорельефа. Были установлены статистически значимые связи мощности органогенного горизонта почв со всеми рассматриваемыми факторами среды. Это доказывает важную роль почвенно-растительного покрова в формировании глубины сезонного протаивания, температурного режима и активности процессов трансформации органического вещества.

Все изученные факторы среды в экосистемах арктической пустыни характеризуются низкой пространственной вариабельностью, что обусловлено однородным характером почвенного покрова и малой мощностью органогенного горизонта почв.

В экосистемах южной тундры содержание углерода микробной биомассы и экстрагируемого углерода почв в большей степени определяется мощностью органогенного горизонта, а в меньшей – влажностью почвы. Для почв экосистем арктической пустыни характерна другая зависимость: наибольшее влияние на содержание исследуемых компонентов углеродного цикла почв оказывает влажность почвы, а меньшее – мощность сезонно-талого слоя. Изучаемые зависимости более четко проявляются в экосистемах южной тундры, о чем свидетельствует лучшее качество регрессионных моделей.

Установлено, что на всех объектах исследования эмиссия диоксида углерода почв в большей степени определяется влажностью почвы и содержанием микробного углерода, а в меньшей – температурой почвы. Изучаемые зависимости эмиссии CO<sub>2</sub> почв от рассматриваемых условий среды более четко проявляются в экосистемах южной тундры, о

чем свидетельствует лучшее качество регрессионных моделей.

В результате проведенных исследований свойств почв и факторов среды можно констатировать, что эмиссия  $\text{CO}_2$ , содержание лабильного и микробного углерода почв характеризуются высокой пространственной вариабельностью во всех исследованных экосистемах.

Систематическая оценка пространственной вариабельности компонентов углеродного цикла почв и эмиссии парниковых газов из почв должна входить в обязательный план работ климатических проектов, реализуемых на территории РФ, так как это позволит снизить неопределенность при оценке глобальных потоков парниковых газов.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (проект № МК-23.2022.1.5).

Автор благодарит Северный арктический федеральный университет (САФУ) им. М.В. Ломоносова за возможность проведения полевых работ на островах архипелагов Земля Франца-Иосифа в рамках проекта «Арктический плавучий университет».

## Оценка экотоксикологического состояния мерзлотных почв Надымского района ЯНАО и Цинхай-Тибетского плато

*Ван В.<sup>1</sup>, Абакумов Е.В.<sup>1</sup>, Низамутдинов Т.И.<sup>1</sup>, Печкин А.С.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия*

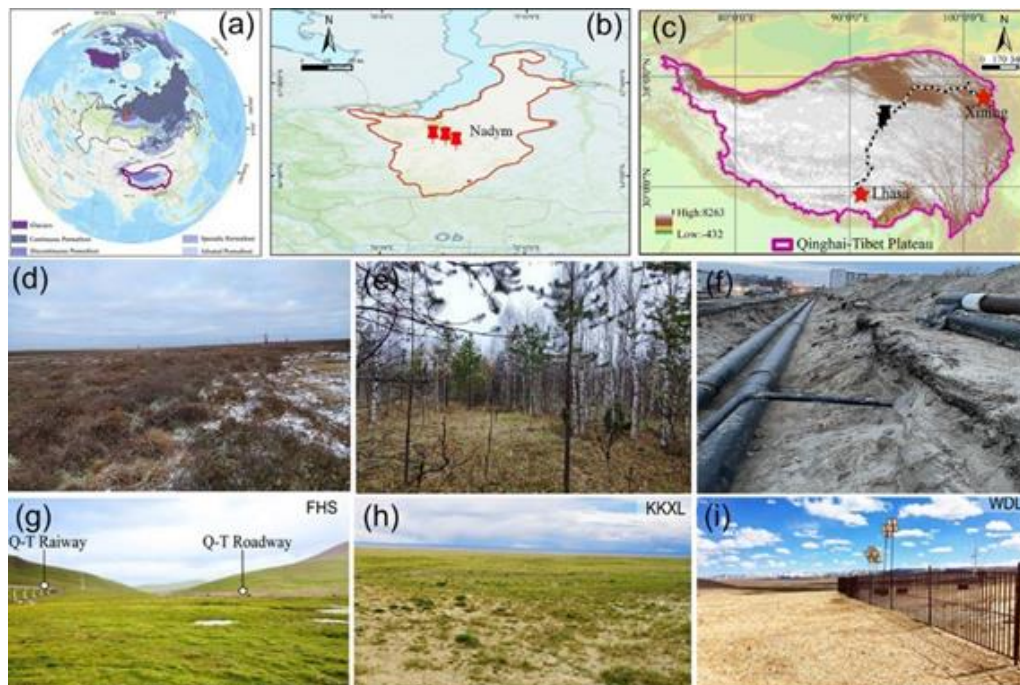
*e-mail: e.abakumov@spbu.ru*

Многолетнемерзлые почвы могут служить конечной точкой аккумуляции тяжелых металлов (ТМ), поступающих из антропогенных источников путём атмосферного и внутрпочвенного латерального переноса из близлежащих регионов. В настоящем исследовании представлены результаты оценки экотоксикологического состояния почв в районах распространения многолетнемерзлых пород в окрестностях г. Надым (Ямало-Ненецкий автономный округ) в России и в центральной части Цинхай-Тибетского плато (ЦТП) в Китае. Результаты исследований показали, что: 1) накопление углерода органических веществ и ТМ сильно различаются для обоих объектов исследования; 2) содержание органического углерода в почвах Надымского района было значительно выше, чем в почвах ЦТП; 3) концентрации металлов в почвах Надымского района были ниже, чем в почвах ЦТП; 4) почвы Надымского района относятся к практически незагрязненным, в то время как среди изученных объектов в Китае в 82,22% случаев для Cd и 8,57% случаев для Hg почвы характеризовались потенциальными экологическими рисками. Было проведено сравнительное исследование основных характеристик накопления ТМ мерзлотных почвах двух компарментов криолитозоны. Районы исследований приурочены к окрестностям г. Надым (ЯНАО, РФ) и к центральной части ЦТП в Китае (рис. 1). В Надымском районе изучали почвы тундр, заброшенных агроэкосистем и почвы городских экосистемы. В связи с тем, что район распространения многолетнемерзлых почв на ЦТП необитаем мы выбрали три ландшафта (альпийский влажный луг, альпийский луг и альпийская пустынная степь) в качестве площадок отбора проб. Почвы окрестностей Надыма представлены преимущественно альфегумусовыми и торфяными почвами и их трансформированными вариантами. На площадках ЦТП почвенный покров представлен слабо развитыми почвами (Inceptisols) и гелисолями (Gelisols). Полевые работы проводились в октябре 2021 и 2022 гг.

Величины pH почвах окрестностей г. Надым составили  $6,06 \pm 0,47$  на ЦТП pH слабощелочной ( $pH 8,15 \pm 0,02$ ). В почвах Надымского района диапазоны содержания органического углерода (SOC) и общего азота (TN) составляли 0,03–16,85% и 0,01–0,66% соответственно. В почвах ЦТП содержание SOC и TN варьируется в пределах 0,26–1,75% и 0,05–0,16% соответственно. Отношение C/N колебалось в диапазоне 0,99–29,9 для почв Надымского района ЯНАО и 5,5–10,95 в почвах ЦТП. Содержание органического углерода в почвах Надымского района было существенно выше, чем в почвах ЦТП. По гранулометрическому составу преобладали пески (содержание фракции 0,05–1 мм –  $64,81 \pm 20,92\%$ ) в почвах Надымского района, почвы ЦТП содержат большую долю пылеватой фракции 0,001–0,05 мм  $73,27 \pm 9,32\%$ .

Концентрации металлов в почвах Надымского района ЯНАО были значительно ниже фоновых значений, что связано со спецификой легких почвообразующих пород (Опекунова и др., 2019). На заброшенных сельскохозяйственных угодьях средние концентрации металлов (Fe–7213 мг кг<sup>-1</sup>, Mn–116 мг кг<sup>-1</sup>, Zn–13,44 мг кг<sup>-1</sup>, As–1,57 мг кг<sup>-1</sup>, Cr–16,31 мг кг<sup>-1</sup>, Ni–6,39 мг кг<sup>-1</sup>) были выше, чем в зональных природных почвах. В почвах тундр фиксировались концентрации Cu (8,05 мг кг<sup>-1</sup>). Концентрация Pb была повышенной в зонах проявления антропогенной нагрузки на экосистемы (6,58 мг кг<sup>-1</sup>). В почвах ЦТП средние концентрации металлов были самыми высокими в почвах альпийского влажного луга, за которым следовал альпийский луг. Самые низкие значения фиксировались в почвах альпийской опустыненной степи. При этом концентрации металлов на ЦТП были ниже фоновых

значений, но концентрации Cd ( $0,68 - 1,03 \text{ мг кг}^{-1}$ ) и Hg ( $0,02 - 0,11 \text{ мг кг}^{-1}$ ) превышали фоновые значения (Cd -  $0,081 \text{ мг кг}^{-1}$ ; Hg -  $0,024 \text{ мг кг}^{-1}$ ). В целом, концентрации металлов в мерзлотных почвах ЦТП были выше, чем в почвах Надымского района, что может быть связано с геохимическими особенностями Надым-Пуровской геохимической провинции и с тем, что ЦТП находится в Центральной Азии и более восприимчив к влиянию индийских муссонов и западным ветрам, приносящим элементы полиметаллического загрязнения из антропогенно нагруженных районов [Wang et al., 2023].



**Рис. 1.** Расположения районов исследований. (a) – часть карты мира. (b) – карта Надымского района. (c) – карта ЦТП. (d, e, f) – фотографии трёх площадок отбора проб Надымского района. (g, h, i) – фотографии трёх площадок отбора проб ЦТП (FHS-Фэн Хошань, KKXL-Хох Силь, WDL-Бу Даолян).

Расчетные величины  $I_{\text{geo}}$  для десяти ТМ показали, что существенного загрязнения в изученных почвах не наблюдалось. В окрестностях Надыма значение  $I_{\text{geo}}$  для Pb соответствовали 3 классу уровня загрязнения (для 9,09% проб). Установлено, что почвы Надымского района находились преимущественно в практически незагрязненном состоянии, а Cd и Hg были главными компонентами экологического риска в многолетнемерзлых почвах на территории ЦТП.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Данная работа выполнена при поддержке НЦМУ «Агротехнологии будущего» договор №075-15-2022-322 от 22.04.2022 и Китайского стипендиального совета (201907010003).

Опекунова М.Г., Опекуно А.Ю., Кукушкин С.Ю. и Ганул А.Г. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422–439. DOI: 10.1134/S0032180X19020114.

Wang W., Abakumov E., Wu X., Ji X., Mu C., Zhu X., and Li G. Accumulation pattern and risk assessment of metal elements in permafrost-affected soils on the Qinghai-Tibet Plateau // Catena. 2023. Vol. 220, No.106665. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106665.

## Содержание углерода и азота в почвах южной тундры Западной Сибири

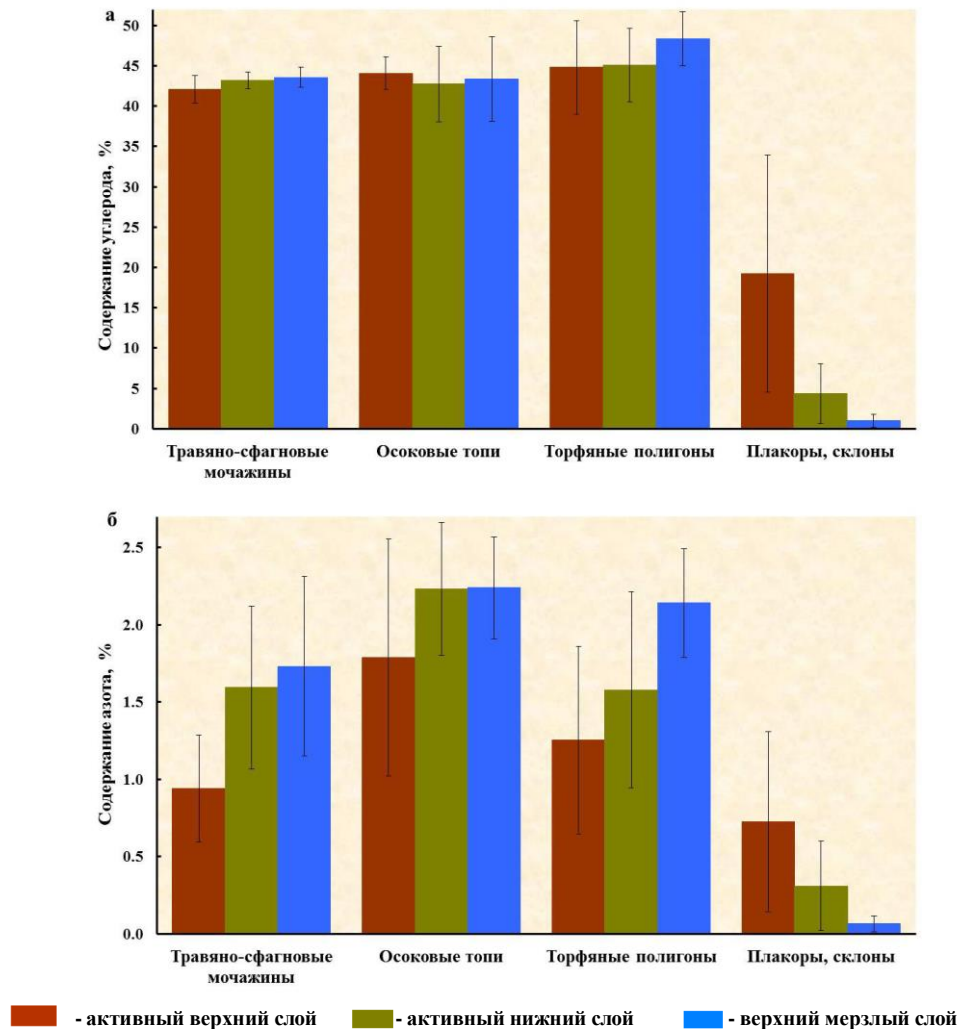
Голубятников Л.Л.<sup>1</sup>, Заров Е.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия  
e-mail: golub@ifaran.ru

Целью данной работы является анализ содержания органического углерода и общего азота в современном сезонно-талом (активном) слое и в верхнем слое мерзлой толщи почв южной тундры Западной Сибири. Полевые исследования проводились в летние сезоны 2013-2017 годов в южной тундре на территории Пур-Тазовского междуречья (Ямало-Ненецкий автономный округ). Исследуемый регион находится в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Для данного исследования были выбраны наиболее распространенные в исследуемом регионе болотные экосистемы (полигоны болот, травяно-сфагновые мочажины, осоковые топи) и экосистемы на плосковершинных возвышениях с минеральными почвами (плакором) и их склонах [Golubyatnikov et al., 2015; Заров и др., 2022]. Сезонно-талый слой на полигонах болот составляет 25-30 см. Болотные воды в оттаиваемом слое торфяных залежей полигонов не наблюдаются. Растительность полигонов состоит из лишайников, сфагновых мхов, вересковых кустарничков и карликовой березки. Уровень болотных вод в травяно-сфагновых мочажинах находится на глубине 10-25 см, сезонно-талый слой составляет 24-31 см. Сфагновые мхи формируют сплошной ковер на этих мочажинах, распространены осоки, пушицы, кустарнички. Торфяная залежь осоковых топей оттаивает до 55 см. Уровень болотных вод находится у поверхности торфяной залежи топей, многие участки покрыты водой. Растительность представлена в основном видами осок и пушицы. Сезонно-талый слой минеральных почв плакоров составляет от 23-50 см до 150 см. В напочвенном покрове плакоров преобладают лишайники, распространены также травянистые сообщества, сфагновые мхи, вересковые кустарнички, карликовые березки и ивы, встречаются заросли ольховника. Склоны плакоров покрыты кустарниковыми сообществами, в напочвенном покрове доминируют мхи, часто встречаются виды из группы разнотравья.

Талый слой рассматриваемых болотных экосистем подразделялся на очёс (горизонт от поверхности до глубины 10-20 см) и торф (от нижней границы слоя очёса и до глубины начала мерзлой толщи). В почвенном покрове плакоров и склонов рассматривались три слоя: верхний до 3-16 см, от границы верхнего слоя до 25-30 см и нижележащий слой до 40-60 см. Образцы почв отбирались для каждого слоя исследуемых экосистем в трех повторностях. В лаборатории проводился анализ содержания органического углерода и общего азота в отобранных образцах на элементном анализаторе EuroVector EA-3000. Полученные результаты (рис. 1) указывают на достаточно близкое содержание углерода в активном и верхнем мерзлом слоях почв рассматриваемых болотных экосистем: активный почвенный слой содержит 42-45% углерода, верхний мерзлый – 44-48%. Содержание углерода в очёсе и в слое талого торфа мочажин отличается незначительно. Следует отметить, что содержание углерода в слое очёса полигонов, в слоях талого торфа и верхнего мерзлого осоковых топей характеризуется значительной вариабельностью. Содержание углерода в почвах плакоров незначительное и характеризуется существенной вариабельностью. Для рассматриваемых болотных экосистем характерно увеличение содержания азота от очёса до верхнего мёрзлого слоя. Содержание азота в почвах плакоров и склонов уменьшается с глубиной. Содержание азота в слоях болотных почв рассматриваемых экосистем изменяется от 0.9% до 2.2%, в слоях минеральных почв – от 0.1% до 0.6%.



**Рис. 1.** Средние значения и стандартные отклонения содержания органического углерода (а) и общего азота (б) в почвенных слоях экосистем южной тундры Западной Сибири.

#### 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).

*Заров Е.А., Голубятников Л.Л., Лапина Е.Д., Лойко С.В.* Растительность и почвы тундровых ландшафтов Пур-Тазовского междуречья // Изв. РАН, сер. биол. 2022. №1. С. 82-92. DOI: 10.31857/S1026347022010188.

*Golubyatnikov L.L., Zarov E.A., Kazantsev V.S., Filippov I.V., Gavrilov G.O.* Analysis of Landscape Structure in the Tundra Zone for Western Siberia Based on Satellite Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. V. 51(9). P. 969–978. DOI: 10.1134/S0001433815090091.



## Роль многолетней мерзлоты в процессах водной миграции соединений органического и неорганического углерода

*Гончарова О.Ю.<sup>1</sup>, Тимофеева М.В.<sup>1,2</sup>, Матышак Г.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

<sup>1,2</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия

*e-mail: goncholga@gmail.com*

Северные экосистемы являются особенно важным компонентом глобальных циклов углерода и азота на планете [Heimann and Reichstein, 2008], учитывая их роль в качестве стока углерода за последние 12 тысяч лет. Большой запас углерода северных экосистем, находящийся непосредственно в почве и законсервированный в мерзлоте, уязвим для любых изменений климата [Schuur et al., 2008]. Деграция многолетнемерзлых пород может изменить как величины экспорта, так и состав растворенного органического углерода из криогенных почв, особенно торфяных, через изменение их гидрологического режима, структуры и функционирования экосистем [Olefeldt and Roulet, 2012]. Основной задачей работы была оценка величин, закономерностей и ведущих факторов перераспределения внутрпочвенных и водных потоков органического и неорганического углерода в масштабе отдельных торфяно-болотных комплексов с сопряженными водными объектами в условиях влияния многолетнемерзлых пород на севере Западной Сибири, ЯНАО.

С использованием модифицированной методики «насыщения свободного пространства» были получены данные по содержанию растворенного  $\text{CO}_2$  во всех водных объектах. Кроме нескольких из них (термокарстовые и лесные озера) содержание растворенного  $\text{CO}_2$  ( $\text{pCO}_2$ ) в водах существенно выше, чем предполагает равновесие с атмосферой, то есть воды являются пресыщенными по  $\text{CO}_2$ . Максимальным пересыщением характеризовались надмерзлотные воды, болотные воды лесных ложбин и ложбин стока в составе торфяно-болотного комплекса. Пересыщение по сравнению с атмосферой в этих объектах составило 15-40 раз. Несколько менее пересыщены воды грядово-мочажинного комплекса, который гидрологически связан с торфяно-болотным комплексом. В реке Лонг-Юган концентрация  $\text{CO}_2$  превышала равновесную в 3,5 раза. Интересные результаты были получены для термокарстовых и лесных озер – их воды или совсем немного пересыщены, или в ряде случаев недонасыщены по  $\text{CO}_2$ . Как и следовало ожидать, величина эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности изученных объектов коррелировала с концентрацией. Ее величина варьировала от отрицательных значений (поглощение) на термокарстовых озерах до 160-200  $\text{mgCO}_2/(\text{m}^2 \text{ ч})$  на лесных ложбинах.

Минимальные величины концентрации растворенного органического углерода были обнаружены в озерных водах: от 5 (лесное озеро) до 20  $\text{mgC/l}$  в небольших озерах спорного генезиса (возможно старичные). Невысокие концентрации (до 25  $\text{mgC/l}$ ) были зафиксированы для лесных ложбин стока и вод грядово-мочажинного комплекса. Максимальные концентрации наблюдались для болотных участков торфяно-болотного комплекса (30-50  $\text{mgC/l}$ ) и надмерзлотных вод (до 100  $\text{mgC/l}$ ). Содержание растворенного органического углерода очень слабо коррелировало с эмиссией и содержанием неорганических форм углерода.

В результате детальных исследований на отдельном торфянике и прилегающих ложбинах, а также по трансекте, пересекающей основные элементы комплекса, были выделены «горячие точки» – зоны с максимальными величинами эмиссии  $\text{CO}_2$ , концентрации  $\text{CO}_2$  и концентрации соединений растворенного органического углерода. Они соответствуют краевым частям торфяников в зоне перехода их в ложбины (обводненные болотные участки). По мере удаления от торфяника все указанные показатели снижаются. Также высокие показатели были характерны для замкнутых ложбин, со всех сторон окруженных торфяниками. Эти данные свидетельствуют о гидрологической связи торфяников и ложбин и значимом выносе с автоморфных позиций органических и неорганических соединений

углерода. Вынос всех форм соединений углерода происходит при движении надмерзлотных вод торфяников по столу мерзлоты, который находится выше, чем уровень окружающих торфяники болот.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 22-24- 00408 «Соединения углерода в системе почва – вода – атмосфера сопряженных ландшафтов криолитозоны Западной Сибири».

*Heimann M., Reichstein M.* Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks // Nature 451, 289–292 (2008). <https://doi.org/10.1038/nature06591>.

*Olefeld, D. and Roulet N. T.* Effects of permafrost and hydrology on the composition and transport of dissolved organic carbon in a subarctic peatland complex // J. Geophys. Res. Biogeosci., 2012, 117, G01005, <https://doi.org/10.1029/2011JG001819>.

*Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J.G., Euskirchen E., Field C.B., Goryachkin S.V., Hagemann S., Kuhry P., Lafleur P.M., Lee H., et al.* Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change: Implications for the Global Carbon Cycle // BioScience 2008, 58, 701–714, <https://doi.org/10.1641/B580807>.

## Эмиссия углекислого газа почвами арктической пустыни (о. Северный, арх. Новая Земля)

*Гусева А.С., Бобрик А.А.*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
e-mail: annapochva@mail.ru*

Арктические территории характеризуются наибольшей уязвимостью к изменению климата. Общий тренд для Арктики за последние несколько десятилетий демонстрируют потепление, почти в два раза превышающее средний глобальный рост температуры на планете. Необходимы данные для оценки влияния изменения климата на функционирование почв и баланс углерода в арктических экосистемах.

В июне 2021 года состоялась экспедиция на о. Северный (арх. Новая Земля). Остров Северный архипелага Новая Земля расположен на северо-западной окраине арктического шельфа Евразии и относится к полярно-арктической географической зоне.

Целью данного исследования является оценка пространственной вариабельности эмиссии диоксида углерода из почв. В ходе экспедиции проведены полевые работы на типичном участке экосистем арктической пустыни (76°56 N, 68°32 E), заложена мониторинговая площадка (размером 5x5 м с шагом 1 м, общее число точек опробования составляет 25). На мониторинговой площадке проведено определение параметров гидротермического режима почв; глубины протаивания многолетнемерзлых пород (методом зондирования щупом); эмиссии углекислого газа (с поверхности почвы с удаленным растительным покровом методом непроточных закрытых камер); были описаны особенности почвенного покрова и отобраны образцы для лабораторных исследований.

Установлено, что все изученные факторы среды (мощность сезонно-талого слоя, влажность почвы, температура почвы) характеризуются низкой пространственной вариабельностью, что обусловлено однородным характером почвенного и растительного покровов, малой мощностью органогенного горизонта почв.

Проведенные исследования показали, что эмиссия диоксида углерода почвами основных экосистем арктической пустыни на мониторинговой площадке (о. Северный) варьировала в широких пределах (от 0 до 122 мгСО<sub>2</sub>\*м<sup>-2</sup>\*час<sup>-1</sup>) и составляла в среднем 31±41 мгСО<sub>2</sub>\*м<sup>-2</sup>\*час<sup>-1</sup> (n=25). Этот показатель характеризуется высокой пространственной вариабельностью: коэффициент вариации составил 134%. Распределение значений эмиссии СО<sub>2</sub> ассиметрично, медиана смещена в сторону низких значений. Полученные значения в целом соответствуют уровню эмиссии диоксида углерода из почв арктической и субарктической зоны. Невысокие по сравнению с данными, полученными для почв о. Шпицберген и оазисов Восточной Антарктиды, средние значения эмиссии СО<sub>2</sub> изученных почв арктической пустыни арх. Новая Земля могут быть обусловлены, как спецификой объектов исследования (близкое залегание к поверхности почвы многолетнемерзлых пород, низкие температуры воздуха, высокая влажность почвенной толщи), так и временем проведения исследования (июнь).

Исследованные почвы характеризуются невысоким содержанием экстрагируемого и микробного углерода, что обусловлено малой мощностью органогенного слоя.

Не выявлено статистически значимой связи эмиссии СО<sub>2</sub> почв исследованных экосистем о. Северный с содержанием экстрагируемого и микробного углерода почв, следовательно, на значения и вариабельность данного параметра наибольшее влияние оказывает широкий спектр факторов среды. Установлена статистически значимая связь эмиссии СО<sub>2</sub> почв на о. Северный (арх. Новая Земля) (июнь, 2021) с влажностью почвы: эмиссия (мгСО<sub>2</sub>\*м<sup>-2</sup>\*час<sup>-1</sup>) = -885(мгСО<sub>2</sub>\*м<sup>-2</sup>\*час<sup>-1</sup>) + 16.4(мгСО<sub>2</sub>\*м<sup>-2</sup>\*час<sup>-1</sup> /%) \* влажность (%), r=0.50, P < 0.05, n=25.

Результаты проведенного исследования позволяют выявить и уточнить факторы и механизмы, определяющие потоки парниковых газов из почв данного региона, что дает

возможность разработать прикладные рекомендации по их использованию, необходимые для успешного социально-экономического развития Арктической зоны РФ.

**БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (проект № МК-23.2022.1.5).

## Потоки метана в полевых манипуляционных экспериментах с дождеванием криогенных почв маритимной Антарктики

*Евграфова С.Ю.<sup>1,2,3</sup>, Кадуцкий В.К.<sup>1</sup>, Корец М.А.<sup>1</sup>, Тимшин А.А.<sup>4</sup>, Масягина О.В.<sup>1</sup>*  
<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия  
<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия  
<sup>3</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия  
<sup>4</sup>Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия  
*e-mail: esj@yandex.ru*

Проведенные недавно исследования [Neumann et al., 2019; Douglas et al., 2020] показали, что при сохранении тенденций глобального изменения климата, в полярных широтах прогнозируется повышение летних температур с одновременным увеличением количества осадков. Это, в свою очередь, повлияет на процессы переноса тепла в почве и, как следствие, на баланс эмиссий парниковых газов. Для арктических экосистем сдвиг баланса в сторону выделения в атмосферу  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  представляется очевидным, в то время как для антарктических экосистем данный вопрос остается открытым.

В этой связи, существует несколько фундаментальных вопросов, требующих оценки: (1) какой период выпадения осадков и какое их количество могут послужить движущей силой для краткосрочного или долгосрочного (в течение вегетационного периода) влияния на криогенные экосистемы? (2) каковы основные факторы/условия (например, температура воздуха, почвы или осадков и т.п.), вызывающие этот эффект? (3) насколько широким будет диапазон ответных реакций почвенных микробных комплексов на увеличение осадков в текущих условиях и прогнозируемых изменениях климата?

В данной работе мы использовали экспериментальный подход для оценки предполагаемой эмиссии метана в ответ на увеличение количества осадков в маритимной антарктической экосистеме (полуостров Файлдс, остров Кинг-Джордж, Южные Шетландские острова, Антарктика). Для двух типов почв: Protic Arenosols (Turbic) и Skeletic Turbic Cryosols, территориально доминирующих на полуострове [Lupachev et al., 2020], в течение вегетационного периода (январь-март) измерялась «фоновая» динамика выделения/поглощения метана при помощи переносного газового анализатора Picarro 4301 (Picarro Inc., США). Также в полевых манипуляционных экспериментах, заложенных на тех же типах почв, были внесены дополнительные осадки (дождевание) и переносным газоанализатором измерялись потоки метана. «Фоновые» потоки  $\text{CH}_4$  измеряли на 20 точках мониторинга, для которых в течение вегетационного сезона было проведено пять измерений (рис. 1).



**Рис.1.** Расположение точек мониторинга потоков парниковых газов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ), слева, отмечено желтым; измерение потоков парниковых газов газоанализатором Picarro G4301, справа.

Отмечено, что Protic Arenosols (Turbic) и Skeletic Turbic Cryosols, вследствие хорошей

аэрированности, продемонстрировали выраженную способность к поглощению метана в течение всего сезона положительных температур, которая варьировала от  $-119,72 \text{ мкг СН}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  до  $-0,71 \text{ мкг СН}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  и была наибольшей в начале января, постепенно снижаясь к концу марта. Если сравнивать оба типа почв, то Protic Arenosols (Turbic) на протяжении всего периода наблюдений находились в равновесном состоянии в отношении эмиссии/поглощения метана, в то время как Skeletic Turbic Cryosols показали выраженную способность окислять  $\text{CH}_4$ .

В экспериментах по дождеванию почв в полевых условиях был исследован отклик потоков метана из почвы на увеличение осадков. В течение трех недель (2 раза в неделю) на участках двух исследуемых почв были проведены следующие манипуляции: дождевание в количестве (1)  $5 \text{ мм м}^{-2}$  (всего  $+30 \text{ мм}$  за период эксперимента к выпавшим за период эксперимента осадкам), (2)  $10 \text{ мм м}^{-2}$  (всего  $+60 \text{ мм}$ ) и (3)  $15 \text{ мм м}^{-2}$  (всего  $+90 \text{ мм}$ ); (4) контрольные участки (без дождевания) –  $28 \text{ мм}$  осадков за период эксперимента. Показано, что внесение, дополнительно к фоновому выпадению, осадков в размере  $90 \text{ мм м}^{-2}$  не изменяло метаноокислительной способности Protic Arenosols (Turbic), но смещало окислительную способность Skeletic Turbic Cryosols в направлении эмиссии метана. Все вышеизложенное позволяет сделать предположение, что при достаточном переувлажнении данных типов почв можно ожидать изменение функциональных характеристик микробоценозов цикла метана, но это вопрос требует дополнительных исследований.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-17-00163. Авторы выражают искреннюю благодарность Российской Антарктической Экспедиции за всестороннюю помощь и поддержку. Часть исследований состоялась благодаря участникам 67 РАЭ Б.И. Бакаленко и А.Г. Тихонову.

*Douglas, T.A., Turetsky, M.R. and Koven, C.D.* Increased rainfall stimulates permafrost thaw across a variety of Interior Alaskan boreal ecosystems. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2020, Vol. 3(1), 28.

*Lupachev, A.V., Abakumov, E.V., Goryachkin, S.V. and Veremeeva, A.A.* Soil cover of the Fildes Peninsula (King George Island, West Antarctica). *Catena*, 2020, Vol. 193, 104613.

*Neumann, R.B., Moorberg, C.J., Lundquist, J.D., Turner, J.C., Waldrop, M.P., McFarland, J.W., Euskirchen, E.S., Edgar, C.W. and Turetsky, M.R.* Warming effects of spring rainfall increase methane emissions from thawing permafrost. *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46(3), 1393-1401.

## Содержание и эмиссия метана в почвах и мерзлых породах Западного сектора Арктики

*Задорожная Н.А.<sup>1</sup>, Облогов Г.Е.<sup>1,2</sup>, Васильев А.А.<sup>1,2</sup>, Малкова Г.В.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия <sup>2</sup>Тюменский  
государственный университет, Тюмень, Россия  
e-mail: z.nataliia.95@gmail.com*

В последние годы многие исследователи отмечают увеличение эмиссии парниковых газов в связи с потеплением климата. При этом многолетнемерзлые породы (ММП) хранят в себе большой объем углеводородных газов, в особенности метана, который является продуктом метаногенеза анаэробных архей в благоприятных для них условиях тундр. За последние десятилетия в Западной Арктике отмечается повышение температуры воздуха, увеличение продолжительности теплого периода и, как следствие, деградация мерзлоты из-за изменения температурного режима пород. Главными источниками метана при этом являются талые криогенные почвы и подстилающие их мерзлые породы.

Количество метана в талых почвах, подстилающей их мерзлоте, а также распределение и эмиссия метана в различных ландшафтах Западного сектора Арктики изучены недостаточно [Васильев и др., 2022; Задорожная и др., 2022]. В данном исследовании проведен анализ концентрации метана в почвах сезонно-талого слоя и нижележащих мерзлых горизонтах в пределах доминантных ландшафтов южной тундры Европейского Севера и типичной тундры Западной Сибири.

Содержание метана измерялось в двух районах исследований: 1 – южной тундре в дельте реки Печора (участок Кумжа, остров Кашин, мыс Болванский), 2 – типичной тундре на западном побережье полуострова Ямал (стационар Марре-Сале). В устье реки Печора два участка (Кумжа и остров Кашин) расположены в зоне островного распространения ММП, мыс Болванский и территория стационара Марре-Сале относятся к зоне со сплошным распространением ММП.

Образцы на определение газового состава отбирались в пластиковые 150-мл шприцы из талых и мерзлых отложений, затем производилась дегазация образцов методом «HeadSpace» [Kampbell et al., 1989]. В дальнейшем в лаборатории ФГБУ ВНИИОкеангеология (г. Санкт-Петербург) определялось содержание метана на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором SHIMADZU GC 2014.

В районе устья реки Печора максимальное количество метана зафиксировано в мерзлых торфяных почвах голоценового возраста (в среднем 5,9 мл/кг), минимальное – в талых торфах (среднее 0,21 мл/кг). Также низкие значения установлены в голоценовых талых песках (в среднем 0,34 мл/кг), в мерзлых песках концентрации метана выше (среднее значение 1,3 мл/кг).

В дельте р. Печоры наибольшее содержание метана (в среднем 2,3 мл/кг) характерно для обнажения в пределах дренированного полигонального голоценового торфяника на острове Кашин (в мерзлом торфе среднее содержание составило 7,9 мл/кг, а в мерзлом песке – 1,5 мл/кг). При этом, в талых почвах в данном ландшафте концентрации метана практически нулевые (0,01 мл/кг в песках и 0,05 мл/кг в торфяных горизонтах). Относительно высокое содержание метана установлено в голоценовых отложениях среднеувлажненной тундры на острове Кашин (в среднем 0,65 мл/кг) и переувлажненной полигональной тундры на мысе Болванский (0,8 мл/кг).

Для района Марре-Сале максимальные концентрации метана зафиксированы в мерзлом голоценовом торфе (среднее 2,8 мл/кг), в талом торфе содержание было значительно ниже – 0,56 мл/кг. Высокие средние значения метана приурочены к мерзлым морским глинам и суглинкам каргинского возраста (в среднем 1,66 мл/кг), слагающим большую часть разреза берегового обрыва Карского моря. Минимальное среднее количество метана выявлено в талых голоценовых аллювиальных и прибрежно-морских песках (в среднем 0,42 мл/кг). Промежуточные значения содержания метана фиксировались в мерзлых песках верхнеплейстоценового возраста (для морских и прибрежно-морских песков – 1,56 мл/кг, для озерно-болотных отложений – 1,4 мл/кг).

Высокие концентрации метана в поверхностных талых отложениях характерны для более увлажненных и заболоченных ландшафтов по сравнению с дренированными. На территории Марре-Сале наибольшее содержание метана установлено для слабодренированных полигональных тундр с мочажинами (среднее содержание 2,4 мл/кг) и для ландшафтов, приуроченных к оврагам, логам и балкам с фрагментами тундр и травяно-моховых болот (в среднем 2,3 мл/кг). Наименьшее содержание метана отмечено в отложениях полигональных дренированных тундр (в среднем 0,09 мл/кг) и в пределах дренированной высокой поймы реки Марре-Яха (среднее 0,22 мл/кг). Тем самым прослеживается четкая корреляция между степенью увлажнения поверхности и продуцированием метана в породах.

Определены пиковые значения удельных потоков метана с поверхности почв в ландшафтах типичной тундры района Марре-Сале. Значительные потоки метана в атмосферу наблюдались на участках заболоченной поверхности низкой и средней поймы, заболоченных понижениях стока поверхностных вод и поверхностях озерных котловин, а также на сильно увлажненных поверхностях полигональных понижений. Максимальное значение потока метана ( $10.7 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) зафиксировано на средней пойме при температуре поверхности около  $+20.0^\circ\text{C}$ . Значения удельного потока метана на поверхностях слабоувлажненных и дренированных ландшафтов всегда менее  $0.1 \text{ мг}(\text{CH}_4) \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ . Учитывая ландшафтную структуру территории Марре-Сале, источниками существенной эмиссии метана являются 45-50% почвенного покрова.

Сравнение концентраций метана в почвах и мерзлых породах изученных районов указывает на более благоприятные условия для метаногенеза в южной тундре Европейского Севера по сравнению с типичной тундрой Ямала. Для обоих регионов характерно более низкое содержание метана в талых отложениях по сравнению с мерзлыми и увеличение концентрации метана в зависимости от степени увлажнения ландшафта. Установленное высокое содержание метана в верхнем горизонте мерзлоты, залегающем непосредственно под сезонно-талым слоем, потенциально может интенсифицировать потепление климата при дальнейшем оттаивании.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 22-27-00181).

*Васильев А.А., Мельников В.П., Задорожная Н.А. и др.* Содержание и эмиссия метана в типичных и южных тундрах западной Арктики // Доклады Академии наук. 2022. Том 505, № 1. С. 114-119. DOI: 10.31857/S2686739722070179.

*Задорожная Н.А., Облогов Г.Е., Васильев А.А. и др.* Метан в мерзлых и оттаивающих отложениях западной Арктики // Криосфера Земли. 2022. Том 26, № 5. С. 41-55. DOI: 10.15372/KZ20220504.

*Kampbell D.H., Wilson J.T., Vandegrift S.A.* Dissolved Oxygen and Methane in Water by a GC Headspace Equilibration Technique // International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1989, Vol. 36, No. 4, pp. 249-257. DOI: 10.1080/03067318908026878.



## Газообмен CO<sub>2</sub> на зарастающих вездеходных путиках Восточной Чукотки

*Замолодчиков Д.Г.*

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия  
e-mail: dzamolod@mail.ru*

Проблема транспортных нарушений в тундрах хорошо известна и обсуждается во многих работах. Путики, оставленные вездеходной техникой, остаются заметными в течение десятилетий и зачастую становятся причиной развития термокарстовых процессов. Изменение характера растительного покрова, температурного режима почв и грунтов в зоне транспортных нарушений сказывается на балансе парниковых газов. Целью настоящей работы было исследование долговременного влияния транспортной активности на состояние активного слоя почвы, растительности и потоков диоксида углерода в типичных дальневосточных тундрах Восточной Чукотки. Ранее в районе работ проводились разнообразные исследования углеродных потоков [Карелин, Замолодчиков, 2008].

Полевые исследования были проведены в конце июля 2015 г. в окрестностях п. Лаврентия на бывшем путике Лаврентия-Лорино. Этот путик активно действовал с конца 1950-х до середины 1980-х годов. Далее была построена автодорога между Лорино и Лаврентия, и основной поток транспорта переместился на нее. Таким образом, исследуемые участки представляют собой заброшенные путики, восстанавливающиеся в течение 30 лет. В районе исследовательских участков заметных термокарстовых процессов не выявлено, однако путики визуально хорошо заметны по отличающемуся состоянию растительности и просевшему состоянию колеиной части.

Исследования проводили на трех участках, отличавшихся по растительному покрову и положению в мезорельефе: 1) иво-осоковая моховая тундра; 2) иво-разнотравная мохово-лишайниковая тундра; 3) депрессия в бугристом болотном комплексе. Измерения потоков парниковых газов осуществляли при помощи портативного газоанализатора, смонтированного на базе сенсора AZ7752. Экосистемные потоки диоксида углерода измеряли в прозрачной пластиковой камере размером 40×40×30 см, на время измерений устанавливаемую на предварительно врезанные в почву алюминиевые основания. Измерения дыхания почвы проводили при герметичной установке крышки на пластиковую трубу. В итоге были получены следующие потоки диоксида углерода: по измерениям в прозрачной камере – обменный поток углерода (NEE); в затемненной камере – экосистемное дыхание (ER); в пластиковом основании – дыхание почвы (SR); расчетным путем по разности NEE и ER – валовая первичная продукция (GPP). Потокам, направленным из экосистемы в атмосферу (ER, SR) присвоен знак плюс, из атмосферы в экосистему (GPP) – знак минус. Синхронно с измерениями потока CO<sub>2</sub> регистрировали температура воздуха и почвы на глубине 10 см при помощи термометр Checktemp1. За сутки измерения однократно проводили определение влажности слоя почвы 0-7 см влагомером HH2 и глубины протаивания мерзлотным щупом (в 3-х повторности для каждого алюминиевого или пластикового основания).

Измерения в иво-осоковой тундре проходили при типовых погодных условиях для июля месяца. Температура воздуха составляла 9.8-9.7°C, температура почвы оказалась выше в контроле (5.6°C), чем на колее (4.4°C). Влажность почвы (39.2%) и глубина оттаивания (66.9 см) оказались заметно выше на колее, чем в контроле (32.2% и 55.3 см соответственно). Измерения в иво-разнотравной мохово-лишайниковой тундре проходили при существенно более высокой температуре воздуха (13.3-13.9 и 15.2-16.7°C соответственно). Такие температурные условия не вполне характерны для региона исследований. В иво-разнотравной мохово-лишайниковой тундре температура почвы была выше на колее (7.7 °C), чем в контроле (6.9°C). Так же на колее были выше влажность почвы (73.2% в сравнении с 56.3%) и глубина оттаивания (56.2 см в сравнении с 30.0 см). В депрессии болотного

комплекса температура почвы оказалась выше в контроле ( $10.1^{\circ}\text{C}$ ), чем на колее ( $8.9^{\circ}\text{C}$ ). Для влажности почвы и глубины оттаивания ситуация типовая: на колее эти величины выше ( $41.7\%$  и  $76.8\text{ см}$ ), чем в контроле ( $34.7\%$  и  $58.5\text{ см}$ )

В иво-осоковой моховой тундре отмечены близкие величины дыхания экосистемы на колее и в контроле, составляющие  $2.44$  и  $2.55\text{ г С м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ . Дыхание почвы несколько выше на колее, составляя примерно  $92\%$  от ER на колее и  $80\%$  в контроле. GPP заметно выше в контроле ( $-2.69\text{ г С м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ ) в сравнении с колеей ( $-2.44\text{ г С м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ ). В результате контрольная тундра является стоком углерода ( $-0.14\text{ г С м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ ), а колея – источником ( $0.78\text{ г С м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ ). Иво-разнотравная мохово-лишайниковая тундра обладает углеродными потоками, сходными с иво-осоковой моховой тундрой. ER по колее и в контроле составляет  $2.59$  и  $2.47\text{ г С м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ , отношение SR/ER  $90$  и  $80\%$  соответственно. GPP выше в контроле ( $-2.33\text{ г С м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ ) в сравнении с колеей ( $-2.14\text{ г С м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ ). Оба варианта были источником углерода, совсем небольшим в контроле ( $0.14\text{ г С м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ ) и более заметным на колее ( $0.45\text{ г С м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ ). Депрессия в болотном комплексе несколько отличается от других участков по структуре углеродных потоков. Дыхание экосистемы достигало наиболее высоких величин ( $4.19\text{ м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$  в колее и  $3.06\text{ м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$  в контроле). Отношение SR/ER, наоборот, было наиболее низким из исследованных участков, составляя  $28\%$  в колее и  $23\%$  в контроле. По величине GPP ( $-3.62\text{ м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ ) колея заметно превосходила контроль ( $-2.10\text{ м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ ), что логично объясняется различием в фитомассе листвы сосудистых растений. Оба варианта были источником углерода: колея  $0.57\text{ м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$  и контроль  $0.96\text{ м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ .

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета типа местообитания при формулировке заключений о влиянии транспортных нарушений на углеродный обмен тундр. В более дренированных повышенных местообитаниях в течение десятилетий отмечается снижение валовой первичной продукции, объясняемое замедленным восстановлением кустарниковой растительности. В результате колея даже после 30 лет восстановления является либо более слабым стоком, либо более сильным источником углерода, чем ненарушенная тундра. Иная ситуация складывается в переувлажненном болотном местообитании. Здесь валовая первичная продукция выше в связи с повышенной фитомассой трав, в то время как снижение фитомассы кустарничков не имеет ключевого вклада в связи с их малочисленностью. В результате восстанавливающиеся путики на болотах становятся более мощным стоком или меньшим источником углерода по сравнению с ненарушенными участками.

#### **Благодарность.**

Обработка данных проведена в рамках реализации ВИП ГЗ «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации» (рег. № 123030300031-6).

*Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г.* Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.

## Динамика почвенных показателей углеродного цикла для горно-луговых экосистем в контексте глобального изменения климата

*Иващенко К.В.<sup>1</sup>, Сушко С.В.<sup>1,2</sup>, Маханцева В.А.<sup>1</sup>, Дворников Ю.А.<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>*Лаборатория карбомониторинга наземных экосистем, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*

<sup>2</sup>*Отдел физики, физико-химии, биофизики почв, Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

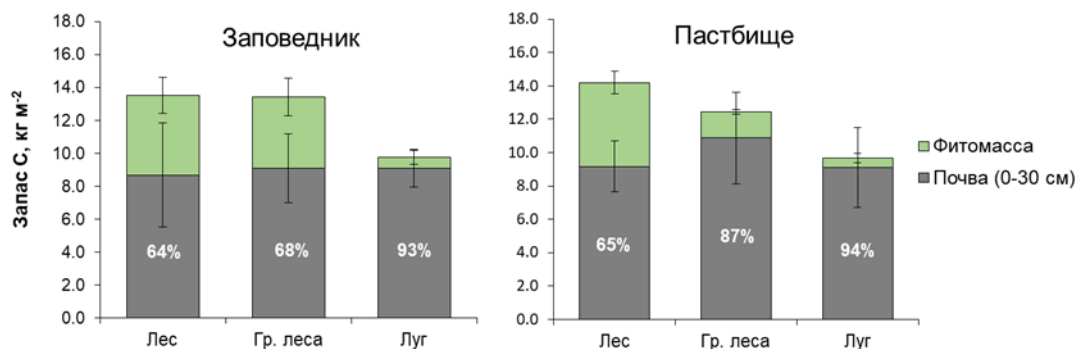
<sup>3</sup>*Лаборатория smart-технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия  
e-mail: ivashchenko.kv@gmail.com*

Запасы почвенного органического углерода (С) в горно-луговых экосистемах наряду с мерзлотными почвами тайги и тундры могут быть значительными, достигая  $30 \text{ кг С м}^{-2}$  [García-Pausas et al., 2007; Пастухов, Каверин, 2013]. Это обусловлено относительно высокой продуктивностью горно-луговых экосистем и холодным климатом, ограничивающим быструю минерализацию поступающих в почву растительных остатков. Ожидается, что изменение климата с сопутствующим повышением температуры воздуха приведет к снижению запасов С в высокогорных почвах вследствие их активной микробной минерализации. К тому же, отмечается, что потепление климата стимулирует продвижение горно-лесного пояса на луга, последствия которого для динамики почвенного цикла С при различных типах землепользования пока сложно спрогнозировать ввиду ограниченного количества данных. Следовательно, наше исследование сфокусировано на оценке изменения количества органического и микробного углерода в горных почвах вдоль лесо-луговых экотонов в условиях заповедного и пастбищного режимов землепользования.

В горах Северо-Западного Кавказа в Карачаево-Черкесской Республике были выбраны три заповедных (2173-2187 м н.у.м., Кавказский государственный природный биосферный заповедник, бассейн р. Большая Лаба, хребет Юха) и три пастбищных склона (1884-1912 м н.у.м., верховье р. Уруп, хребет Чапаллы) северо-восточной экспозиции. В лесу, на границе леса и субальпийском лугу каждого горного склона случайным образом были выбраны три точки исследования, в которых были отобраны почвенные образцы по профилю (последовательно через каждые 10-20 см). Почвы диагностировали как буроземы и буроземы темно-гумусовые. Их максимальная мощность достигала 70 и 100 см на заповедных и пастбищных горных склонах соответственно. В почвенных образцах определяли содержание органического С и микробного биомассы ( $C_{\text{мик}}$ ), рассчитывали их запасы с учетом плотности, мощности и каменистости (%) почвенных слоев в профиле. Дополнительно оценивали запасы С в фитомассе древесного (лес и граница леса) и травяного ярусов (лес, граница леса и луг) для изученных горных склонов.

Запасы органического С и  $C_{\text{мик}}$  в метровом профиле почвы субальпийского луга достигали  $23 \text{ кг м}^{-2}$  и  $358 \text{ г м}^{-2}$ . При этом вклад верхнего 30 см слоя почвы в суммарный запас С и  $C_{\text{мик}}$  составил больше половины (58 и 77% соответственно). Таким образом, сравнительная оценка запасов С и  $C_{\text{мик}}$  вдоль лесо-луговых экотонов была проведена для слоя 0-30 см, учитывая его репрезентативность и значительную вариацию мощности почвенного профиля для изученных экосистем и горных склонов. Показано, что значимых изменений запасов С почвы (0-30 см) от лесных экосистем к луговым не обнаружено, при этом его общий запас (почва + фитомасса) в экосистеме субальпийского луга был в 1.4 и 1.5 раза меньше по сравнению с лесами (рис. 1). Запас почвенного  $C_{\text{мик}}$  значимо не различался между изученными экосистемами, составив в заповеднике 152, 181 и 198  $\text{г м}^{-2}$  для леса, границы леса и луга соответственно, на пастбище – 183, 187 и 190  $\text{г м}^{-2}$ . В то же время, на фоне стабильного распределения почвенных запасов С и  $C_{\text{мик}}$  вдоль изученных экотонов, выявлена тенденция увеличения их содержания (концентрация на г почвы) от леса к лугу, наиболее значимые изменения отмечены в заповеднике (увеличение в 1.5 и 1.9 раз). Такое различие

закономерностей распределения в содержании и запасах связано с варьированием плотности почвы, величина которой значительно уменьшалась от лесов к лугам и от пастбищных склонов к заповедным.



**Рис. 1.** Общий запас органического углерода (С) в 30 см слое почвы и фитомассе для леса, границы леса и луга заповедного и пастбищного горного склонов. Значения в % - вклад 30 см слоя почвы в общий запас С.

Итак, можно предположить, что при смещении горно-лесного пояса на луга увеличится общий запас С на 40-50% в основном за счет фитомассы древостоя. При этом запасы С и  $C_{\text{мик}}$  в почве значительно не изменятся как в условиях заповедного, так и пастбищного режимов землепользования. Вместе с тем, есть основание полагать, что изменится качественный состав органического вещества почвы, а именно увеличится доля его наиболее стабильной (минерально-ассоциированной) фракции при динамике горно-лесного пояса (Сушко и др., 2022).

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Экспедиция, отбор образцов и их анализ выполнен при финансовой поддержке РФФ № 22-74-10124, расчет почвенных запасов углерода проведен в рамках Государственного задания № 122111000095-8.

*Garcia-Pausas J., Casals P., Camarero L., Huguet C., Sebastia M.-T., Thompson R., Romanya J.* Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: effects of climate and topography // *Biogeochemistry*, 2007, Vol. 82, pp. 279–289. DOI: 10.1007/s10533-007-9071-9

*Пастухов А.В., Каверин Д.А.* Запасы почвенного углерода в тундровых и таежных экосистемах Северо-Восточной Европы // *Почвоведение*. 2013. № 9. С. 1084-1094.

*Сушко С.В., Иващенко К.В., Комарова А.Е., Юдина А.В., Благодатский С.А.* Динамика фракционного состава органического вещества почвы при зарастании субальпийских лугов лесами // «Почвоведение. Горизонты будущего. 2022»: Сборник тезисов докладов шестой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева, посвященной 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева / г. Москва, (24-28 октября 2022 г.). М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2022. С. 130–131.

## Влияние пожаров на потоки химических элементов в криогенных лесоболотных ландшафтах Западной Сибири

*Кузьмина Д.М., Лойко С.В., Лим А.Г., Крицков И.В.*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
e-mail: kuzmina.d.m.95@gmail.com*

Пожары в таежной зоне являются естественным явлением, появляется все больше данных о том, что частота пожаров на территории севера Западной Сибири начала увеличиваться за последние тысячу лет. При сгорании растительности во время пожара на поверхности почвы образуется специфический эфемерный слой из золы и прочих продуктов горения. Этот эфемерный слой по своим геохимическим свойствам очень сильно отличается от исходных растительности и не горевших органогенных горизонтов (подстилки, болотный очес и верхние органогенные горизонты). В нормальных условиях продукты естественного выщелачивания опада могут быть перехвачены корневыми системами растений и вновь включены в биологический кругооборот. Однако сразу после пожара из возникшего высокорекреационного субстрата химические элементы могут быть вынесены за пределы почвенного профиля, так как биогенный перехват не работает в связи с уничтожением растительности. Не смотря на быстрое обеднение постпирогенной экосистемы, потерю элементов минерального питания, а также влияние на геохимический речной сток этот феномен, как и особенности сгоревшего субстрата в широком географическом масштабе не был изучен. В связи с этим была предпринята попытка экспериментального геохимического моделирования выноса химических элементов из сгоревших органогенных горизонтов, а также оценка вклада пожара в годовой речной сток в масштабе водосбора.

Для моделирования был использован экспериментальный метод, для которого производилось сжигание в лабораторных условиях верхних органогенных горизонтов торфяных почв плоскобугристого мерзлого болота и органогенных горизонтов подзола светлохвойного леса. Район исследования представляет собой плоскую террасу реки Пякупур, которая характеризуется сильной заболоченностью и заозеренностью. Было заложено два ключевых участка, первый на мерзлом плоскобугристом болоте, второй в сосняке лишайниковом зеленомошном. На болоте с бугров пучения были отобраны образцы очеса разного ботанического состава, так как растительность именно этих позиций рельефа уничтожается пожарами. В сосняке лесные подстилки отобраны с трех элементов рельефа (вершина и склон дюны и междюнное понижение). В лабораторных условиях пробы высушивались, измельчались и усреднялись после чего подвергались сжиганию. Для образцов болотного очеса была выбрана температура 525 С°, далее из озоленного субстрата готовили вытяжку с деионизированной и озерной водой, отбор водных проб осуществлялся со следующим временным интервалом: 1, 5, 10, 30, 100 минут и 5, 24, 50, 167 часов взаимодействия. Усредненные образцы органогенных горизонтов подзолов озолялись при трех температурах (300, 450, 600 С°), далее зола каждой температуры выщелачивалась деионизированной водой, отбор водных вытяжек производился спустя 1 сутки и неделю взаимодействия. Также для органогенных горизонтов подзола получены данные для негоревших подстилок, согласно описанному протоколу. Во время отбора водных вытяжек все пробы фильтровались (0,45 мкм), в нефильтрованной пробе определялись показатели рН и электропроводности. В водных вытяжках определены показатели органического и неорганического углерода и химический состав раствора.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что обогащение раствора Na, Ca, Mg, P, K, Si происходит в кратчайшие сроки, и более 50% от максимального выхода этих элементов происходит в первые сутки. Наиболее реакционной является моховая зола, как для ключевого участка на болоте (моховой очес), так и для подзола (горизонт OT) в сосняке лишайниковом. Содержание растворенного органического вещества уменьшалось с повышением температуры озоления и было значительно ниже, чем измеренная в фильтрах

исходных несожжённых проб подстилки. Выход большинства измеренных параметров (нормированный на массу), из свежей подстилки значительно (в 3–10 раз) выше, чем из ее золы. На эту закономерности никак не повлияла температура озоления, ботанический состав сжигаемого горизонта, а также его положение в рельефе.

Таким образом, зола, полученная при сжигании органогенных горизонтов плоскобугристого болота и соснового леса по сравнению с ее не горевшими аналогами менее реактивная. Выход химических элементов из золы по сравнению с органогенными горизонтами очень мал. При пожаре происходит уничтожение растительность и как следствие разрыв биологического круговорота поэтому, выщелоченные из золы растворенные вещества мигрируют за пределы почвенного профиля и попадают в гидрологическую сеть. Для лесоболотных ландшафтов максимальное поступление химических элементов из золы в реки, после сгорания органогенных горизонтов торфяных почв, пренебрежимо мало (<1-2%), по сравнению со средним годовым речным выносом, однако данный вывод распространяется только на большой водосбор крупной реки, который полностью выгорает в течение 56 лет. И если оценивать влияние пожара для маленького водосбора, то этот эффект в определенный год будет значительно выше.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ.**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 21-54-75001-БФ\_Почвы.

## Эмиссия метана из болотных экосистем стационара «Мухрино» среднетаёжной зоны Западной Сибири

*Ларина А.В.<sup>1,2</sup>, Кривенко Л.А.<sup>1</sup>, Казанцев В.К.<sup>1</sup>, Ретина И.А.<sup>1,3,4</sup>*

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия*  
*e-mail: larin.arina2003@gmail.com*

Парниковые газы (ПГ) вызывают нагрев нижних слоев атмосферы при частичном поглощении инфракрасного излучения. К ПГ относится исследуемый нами метан (CH<sub>4</sub>), важные природные источники которого – болота и заболоченные земли. Глобальная эмиссия CH<sub>4</sub> от этих экосистем составляет от 102 до 182 МтCH<sub>4</sub> год [IPCC, 2021].

Исследование проводилось в среднетаёжной зоне Западной Сибири на полевой станции «Мухрино». Объектом изучения стало олиготрофное сфагновое болото (Мухринский торфяник). Цель работы – оценка диффузионных удельных потоков CH<sub>4</sub> (УПМ) с разных элементов микроландшафта изучаемого болотного массива. В задачи исследования входило:

1. проведение натурных измерений УПМ с различных типов болотного микроландшафта;
2. фиксация потенциально влияющих на эмиссию параметров окружающей среды;
3. изучение влияния условий окружающей среды на значения УПМ.

Для изучения пространственной неоднородности потока метана были выбраны контрольные участки, различающиеся по положению в рельефе, уровню болотных вод (УБВ) относительно поверхности мха, растительному сообществу:

- гряда – положительный элемент микроландшафта, характеризующийся глубоким залеганием болотных вод (глубже –30 см) и аэробной средой в верхней части профиля торфа. Растительность представлена сфагновым мхом, багульником болотным, морошкой;
- мочажина – отрицательный элемент микроландшафта, имеющий постоянное увлажнение (УБВ от –10 до –4 см). В растительном сообществе преобладают сфагновые мхи, осоковые;
- топь – самая обводненная точка (УБВ от –3 до 1 см), является чрезмерно увлажненной мочажинной. Эдификаторы растительного сообщества: сфагновые мхи и осоковые.

На точках измерялся газообмен между атмосферой и поверхностью болота методом статических камер [Глаголев и др., 2010]. Камеры из оргстекла имели объем 46 и 64 дм<sup>3</sup> и площадь основания 36x36 см<sup>2</sup>. Отобранные пробы анализировались на хроматографе «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором.

Фиксация метеопараметров производилась автоматически на микрометеорологических вышках. Температура почвы измерялась температурными логгерами Thermochron iButton на глубинах 0, 5, 10, 20 и 50 см.

По результатам проведенных измерений были рассчитаны значения УПМ на изучаемой территории и замечен синусоидальный характер их суточных колебаний со средними амплитудами 0,04, 2,4 и 9,4 мгCH<sub>4</sub>м<sup>-2</sup>ч<sup>-1</sup> для гряды, топи и мочажины соответственно. Установлено влияние пространственной неоднородности на эмиссию CH<sub>4</sub> с элементов микроландшафта, характеризующихся различными гидротермическими условиями. Статистические характеристики УПМ за период измерений приводятся на рис. 1.

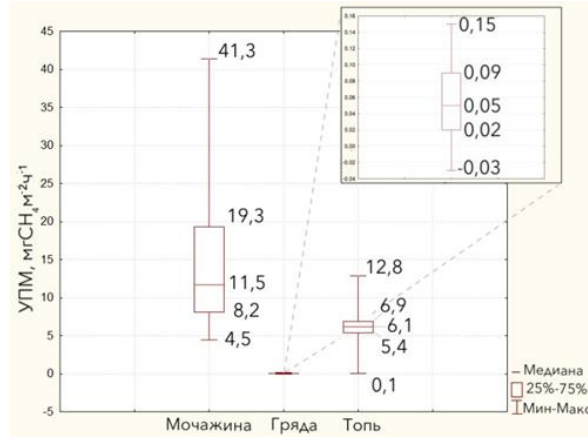


Рис. 1. Статистические характеристики УПМ на мочажине, гряде и топи

На гряде отмечается как эмиссия, так и незначительное поглощение  $\text{CH}_4$ , что объясняется расходом метана в процессе жизнедеятельности метанотрофов.

Наиболее высокие значения УПМ наблюдаются на мочажине, что можно объяснить выходом метановых пузырей.

Были рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (p-value 0,05) для выявления связи между параметрами окружающей среды и УПМ (табл. 1).

УПМ с ключевого участка	Коэффициент корреляции по Спирмену						УБВ
	Температура воздуха	Температура почв					
		0 см	5 см	10 см	20 см	50 см	
Мочажина	0,48	0,38	0,34	-0,01	-0,18	-0,28	0,03
Гряда	0,02	0,11	0,11	0,03	-0,04	0,08	-
Топь	0,52	0,63	0,71	0,60	0,57	-	-0,64

Табл. 1. Результаты теста ранговой корреляции Спирмена для выявления корреляций между УПМ на разных точках и соответствующими им параметрами среды

Наибольшая связь между УПМ и УБВ, температурой воздуха и почвы на глубинах 0, 5, 10 и 20 см была замечена на топи, на мочажине присутствует слабая связь с температурой воздуха, а на гряде влияние факторов внешней среды на УПМ не. Отмечено, что на мочажине, где УБВ ниже, чем на топи, величина УПМ выше. Вероятно, это связано с тем, что интенсивность эмиссии метана определяется не УБВ как таковым, а анаэробными условиями, то есть содержанием кислорода [Глаголев, 2012], а также возможными различиями в содержании органического вещества.

По итогам проведенных натурных измерений были оценены УПМ с разных элементов микроландшафта олиготрофного болота, которые имели выраженный синусоидальный суточный ход. Также было оценено влияние факторов внешней среды на УПМ и замечена наибольшая связь на топи.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №22-47-04408. Авторы выражают благодарность коллективу, совместно работавшему во время полевого выезда на стационар «Мухрино» в июне 2022 г. за помощь в пробоотборе и предоставление метеоданных.

Глаголев М.В. Высокий уровень стояния воды может снижать эмиссию метана из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2012 Т. 3. № 1(5). EDCCmis0003.

Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. Измерение газообмена на границе почва/атмосфера. – Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2010. – 96 с.

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA, 2391 pp.



## Минерализация углерода в почвах мерзлотных экосистем

*Матвиенко А.И.<sup>1</sup>, Масыгина О.В.<sup>1</sup>, Пономарёва Т.В.<sup>1,2</sup>, Гродницкая И.Д.<sup>1,2</sup>, Евграфова С.Ю.<sup>1,2,3</sup>*

*<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия*

*<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*

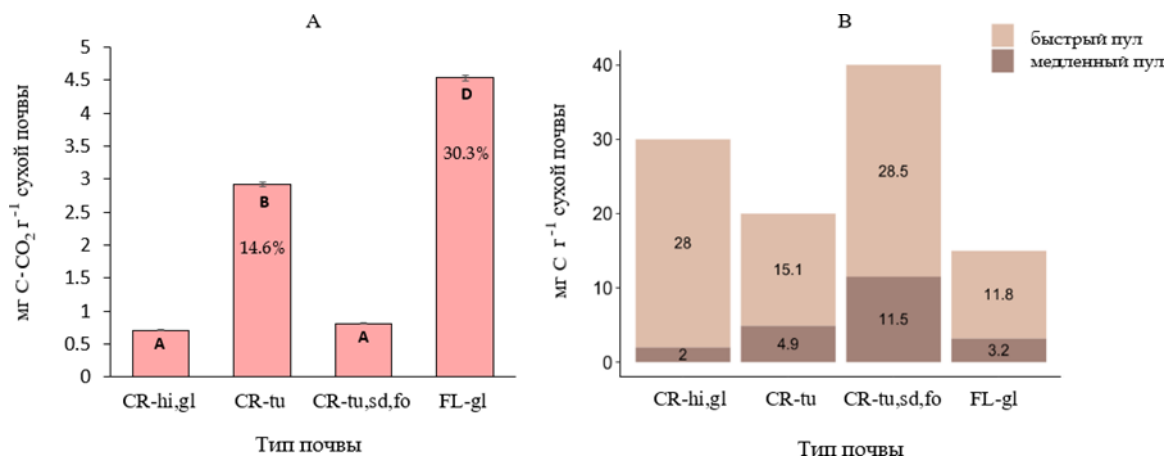
*<sup>3</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия*

*e-mail: matvienko.ai@ksc.krasn.ru*

Восприимчивость арктических экосистем к глобальным изменениям климата подтверждена многочисленными исследованиями. Поэтому изучение микробной активности почвы и процессов минерализации почвенного органического вещества являются важной задачей для понимания пространственного и временного варьирования потоков углерода в мерзлотных экосистемах, а также оценки влияния на них различных факторов. В зависимости от физико-химических и биологических параметров процесс разложения перераспределяет органический углерод (С) почвы (С<sub>орг</sub>) в пулы, различающиеся по размеру, возрасту и может быть описан математическими моделями различной сложности.

Почвенная инкубация – это хорошо известный лабораторный метод, используемый для изучения и моделирования динамики цикла С. Мы провели долгосрочный инкубационный эксперимент, в ходе которого получили данные о скорости выделения CO<sub>2</sub> из образцов минеральных горизонтов (10-20 см) четырех типов почв Histic Gleyic Cryosols (CR-hi,gl), Turbic Cryosols (CR-tu), Turbic Spodic Follic Cryosols (CR-tu,sd,fo), Gleyic Fluvisols (FL-gl), отобранных с трех площадок, расположенных на расстоянии не менее 500 м от дорог и промышленных объектов, в пределах Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района и города Норильска. В первые две недели образцы инкубировали при температуре +22°C, затем их поместили в инкубатор с Пельтье охлаждением (Memmert, Germany) при +4°C, где они находились до окончания эксперимента (180 суток). Базальное дыхание почв измеряли в 0, 3, 7, 14, 60, 122 и 180 день инкубации с помощью автоматизированной системы, состоящей из ИК-анализатора LI-8100, 16-портового мультиплексора LI-8150 (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA) и инкубатора. Также было рассчитано кумулятивное количество С (мг на г сухой почвы), выделившегося из почвенных образцов за время эксперимента. Временные ряды данных и данные по содержанию С<sub>орг</sub> в изучаемых почвах использовали в двухпуловой модели с обратной связью (Sierra, Müller, and Trumbore, 2012) для получения следующих параметров: скорости разложения быстрого и медленного пулов – k<sub>1</sub> и k<sub>2</sub> (мкг С г<sup>-1</sup> сухой почвы сут<sup>-1</sup>), количества С, переходящего из быстрого в медленный пул и обратно – alpha<sub>21</sub> и alpha<sub>12</sub>, и коэффициента gamma – количества углерода в каждом пуле в начале эксперимента (табл. 1) [Masyagina et al., 2023].

На основе этих коэффициентов, по формулам Manzoni et al. [2009], [Sierra et al., 2017], рассчитали средний возраст (MSA – mean system age) и среднее транзитное время (MTT – mean transit time) – параметры, с помощью которых, при некоторых допущениях, можно судить о свойствах изучаемых почв и их минерализационном потенциале. Было обнаружено, что в зависимости от типа почвы микробиологическая активность почв различалась по динамике выделения CO<sub>2</sub> в течение эксперимента и по общему количеству С, минерализованного за время эксперимента (рис. 1, А).



**Рис. 1.** (А) Кумулятивное количество С, выделившееся за время эксперимента из образцов минеральных горизонтов 4-х типов почв; разные заглавные буквы обозначают различия между типами почв (по критерию LSD Фишера). (В) Количество Сорг в почвах разных типов и количество С в быстрых и медленных пулах (цифры внутри столбиков), рассчитанное из параметра gamma, полученного с помощью двухпуловой модели).

Turbic Cryosols и Gleyic Fluvisols показали наибольшую активность, и, выделили 14.6 и 30.3% от его общего запаса, несмотря на меньший показатель содержания Сорг (рис. 1, В). Результаты моделирования показали, что в этих почвах скорости разложения быстрого пула ниже, а медленного пула – выше, чем в образцах двух других типов почв. Вероятно, именно со скоростью минерализации медленного пула связано большее количество выделившегося за эксперимент CO<sub>2</sub> и более низкие значения MSA и MTT (табл. 1).

Тип почвы	k1	k2	alpha21	alpha12	MSA, years	MTT, years
CR-hi,gl	35.55±4.67a	0.07±0.06a	0.97±0.00a	0.68±0.01a	41380	40523
CR-tu	17.27±3.12b	1.51±0.49b	0.85±0.02b	0.29±0.04b	887	818
CR-tu,sd,fo	26.45±0.59c	0.05±0.01c	0.98±0.00c	0.29±0.00b	26139	25670
FL-gl	19.77±9.52db	2.30±1.39d	0.83±0.03d	0.08±0.05c	467	443

**Табл. 1.** Параметры, рассчитанные с помощью двухпуловой модели с обратной связью; разные красные буквы обозначают различия между типами почв (по двустороннему t -критерию, p <0.05).

Histic Gleyic Cryosols и Spodic Folic Cryosols выделили за время инкубации по 2.4 и 2% от Сорг, соответственно. Высокий процент перехода углерода из быстрого пула в медленный и обратно (97 и 68%) в Histic Gleyic Cryosols свидетельствовал о его циркуляции внутри системы. В свою очередь, низкая скорость разложения медленного пула в этих типах почвы, а также высокие величины MSA и MTT указывают на их способность к более долговременному хранению Сорг.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РНФ №21-17- 00163, №23-14-20007 и РФФИ №19-29-05122.

Masyagina O.V., Matvienko A.I., Ponomareva T.V., Grodnitskaya I.D., Sideleva E.V., Kadutskiy V.K., Prudnikova S.V., Bezbido V.S., Kudryavtseva K.A., Evgrafova, S.Y. Soil contamination by diesel fuel destabilizes the soil microbial pools: Insights from permafrost soil incubations. *Environmental Pollution*, 2023, Vol. 323, 121269.

Sierra C.A., Müller M., Trumbore S E. Models of soil organic matter decomposition: the SoilR package, version 1.0. *Geoscientific Model Development*, 2012, Vol. 5, No. 4, pp. 1045-1060.

Sierra C.A., Müller M., Metzler H., Manzoni S., Trumbore S.E. The muddle of ages, turnover, transit, and residence times in the carbon cycle. *Global Change Biology*, 2017, Vol. 23, No. 5, 1763-1773.

## Запасы углерода в почве под лиственничными редколесьями лесотундры Средней Сибири

*Мухортова Л.В., Кривобоков Л.В., Метелева М.К., Пашкева О.Э., Бондарев А.И.*  
*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*  
*e-mail: l.mukhortova@gmail.com*

Органическое вещество (ОВ) почвы представляет собой один из наиболее мощных резервуаров в глобальном круговороте углерода. Аккумулированный в ОВ почвы углерод за счет физического и химического связывания может выводиться из круговорота на десятки, сотни и даже тысячи лет. В почвах экосистем, развивающихся на вечной мерзлоте, органическое вещество в значительной степени также защищено от разложения низкими температурами.

Органический углерод, накопленный в мерзлотных почвах, имеет большое значение для глобальной климатической системы, поскольку он может включиться в круговорот в результате оттаивания почвы при потеплении климата. Разложение этого ранее законсервированного ОВ способно привести к дополнительному выбросу парниковых газов в атмосферу.

Более точные и надежные оценки общего количества органического углерода в мерзлотных почвах должны включать оценку его распределения по геоморфологическим позициям и внутри почвенного профиля. Это имеет большое значение для моделирования динамики углерода в мерзлотных почвах и для оценки его депонирования в наземных экосистемах субарктической зоны.

Мелкомасштабная вертикальная и горизонтальная неоднородность запасов органического вещества почвы является важным фактором, влияющим на оценки запасов органического углерода в почве субарктики. Информация о вертикальном распределении запасов углерода в мерзлотных почвах чрезвычайно важна для прогнозирования количества почвенного органического углерода, который станет доступным для минерализации при изменении климата или в результате естественных или антропогенных нарушений.

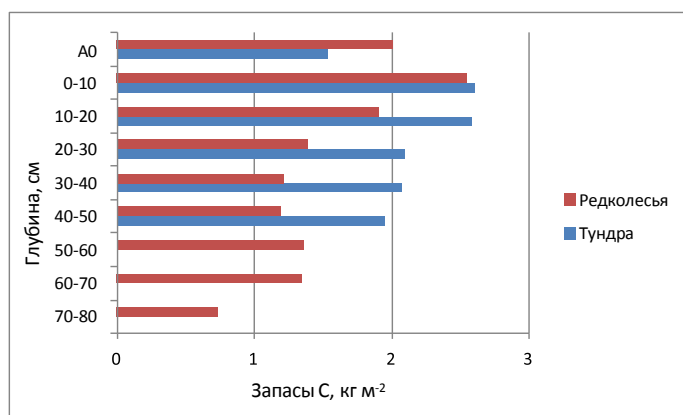
Для того чтобы оценить влияние растительности на аккумуляцию и распределение органического углерода в почвах, мы сравнили запасы углерода в почве и в слое подстилки в лесотундре Средней Сибири. Исследования проводили в урочище Ары-Мас (N 72.44°, E 101.63°), расположенном на южном берегу реки Новая. Этот район представляет большой интерес, поскольку это самый северный изолированный лесной остров в мире, отделенный от ближайших лесов 25 километровой зоной тундр. Данный участок является кластером Таймырского заповедника, созданного в 1973 году. Территория исследования расположена в зоне, определенной на карте растительности Циркумполярной Арктики как влажная карликово-кустарниковая тундра [Walker et al., 2005] или, по схеме ботанико-географического районирования российской геоботанической школы, в подзоне южных тундр [Юрцев, 1966]. Вегетационный период в данном регионе ограничен периодом заморозков, и на Таймыре он длится в среднем всего около 2,5 месяцев. Древесная растительность здесь представлена лиственничными (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) редианами и редколесьями. Запасы углерода определяли в подстилке и в активном слое почвы на 11 пробных площадях, заложенных в лиственничных редколесьях кустарничково-зеленомошного типа разного возраста и сомкнутости древостоя, а также, для сравнения в тундре кустарничково-зеленомошной.

Мощность слоя подстилки не изменяется достоверно в лиственничных редколесьях разного возраста и составляет  $7.5 \pm 1.5$  см под 114-123-летними древостоями,  $6.5-6.7 \pm 0.4$  см под 140-160-летними и достигает  $8.3 \pm 1.2$  см в 180-летних лесных экосистемах.

Запасы углерода в этом горизонте, соответственно составляют от 1.2 до 2.9 кг м<sup>-2</sup> и закономерно увеличиваются с увеличением возраста древостоя. Мощность органогенного горизонта под тундровой растительностью также не отличается значимо от такового в

лиственничных редколесьях и составляет  $6.6 \pm 2.5$  см или  $1.5 \text{ кгС м}^{-2}$ .

Глубина оттаивания почвы в июле составляет от 20 до 60 см, но в некоторых случаях может достигать и 80 см. В активном слое почвы исследованных лиственничных редколесий аккумулировано от 4.8 до  $17.4 \text{ кг С м}^{-2}$ . Запасы углерода в почве закономерно увеличиваются с увеличением глубины оттаивания. Наиболее высокие запасы (от 3.4 до  $5.6 \text{ кгС м}^{-2}$ ) аккумулированы в верхнем 20-см слое почвы (рис. 1). Ниже по профилю не наблюдается резкого снижения запасов углерода, поскольку не происходит какого-либо значимого снижения содержания органического вещества. В почве под тундровой растительностью снижение запасов углерода на глубине больше 20 см выражено меньше, чем в почве редколесий. Такие отличия в характере внутрипрофильного распределения запасов углерода, вероятно, связаны с более выраженными криогенными процессами перемешивания почв под тундровой растительностью, которые способствуют попаданию большего количества органического вещества из верхних слоев почвы в нижележащие горизонты.



**Рис. 1.** Распределение запасов углерода в профиле почв под лиственничными редколесьями и под тундровой растительностью.

#### 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 бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Юрцев Б.А. Гипоарктический ботанико-географический пояс и происхождение его флоры. М.: Наука, 1966. 94 с.  
Walker D.A., Raynolds M.K., Daniëls F.J., Einarsson E., Elvebakk A., Gould W.A., Katenin A.E., Kholod S.S., Markon C.J., Melnikov E.S., Moskalenko N.G. The circumpolar Arctic vegetation map. //Journal of Vegetation Science, 2005, Vol.16, No. 3, pp. 267-282.

## Прогноз минерализации углерода и эмиссии парниковых газов при деградации многолетней мерзлоты на южной границе восточно-европейской криолитозоны

*Пастухов А.В.<sup>1,2</sup>, Knoblauch К.<sup>3</sup>, Каверин Д.А.<sup>1</sup>, Лойко С.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия*

<sup>2</sup>*Лаборатория BIO-GEO-CLIM, НИЦ Томский государственный университет, Томск, Россия*

<sup>3</sup>*University of Hamburg, Institute of Soil Science, KlimaCampus, Hamburg, Germany*

*e-mail: alpast@mail.ru*

На северо-востоке европейской части России в результате потепления климата уже в настоящее время происходит деградация многолетнемерзлых пород. Многолетнемерзлые торфяники, занимая лишь около 20% площади европейской криолитозоны России, содержат почти 50% запасов почвенного органического углерода (ПОУ). ПОУ, законсервированный в многолетней мерзлоте, при деградации последней считается наиболее уязвимым для микробной минерализации.

Настоящее исследование выполнено на трех ключевых участках с обширными бугристыми болотами, расположенных вдоль южной границы многолетней мерзлоты. Разложение ПОУ изучали в ходе эксперимента с искусственной инкубацией торфа в аэробных и анаэробных условиях при температуре 4°C в течение 1301 суток [Pastukhov et al., 2022]. Количество эмитируемого CO<sub>2</sub> было измерено в образцах торфа на трех ключевых участках, взятых из сезонно-талого слоя (AL), многолетнемерзлого слоя (PL), так называемого переходного слоя (TL) (находящегося на контакте AL и PL), а также слоя многолетнемерзлого торфа, находящегося на контакте с минеральными отложениями (DPL) (образцы взяты на глубине 3,7 м только на третьем ключевом участке). В ходе эксперимента исходные скорости эмиссии CO<sub>2</sub> достоверно различались в пробах AL, TL и PL на всех ключевых участках. Тем не менее, скорость эмиссии CO<sub>2</sub> была в 2–5 раз выше аэробных, чем анаэробных условиях на каждом участке в большинстве проб. В анаэробных условиях на всех трех ключевых участках скорость эмиссии CO<sub>2</sub> была наименьшей в PL, выше в TL и наибольшей в AL. Прогноз доли минерализованного ПОУ от исходного многолетнемерзлого углерода в аэробных условиях с эмиссией CO<sub>2</sub> за 80 лет составляет 1,44%±0,11; 6,31±0,47 и 30,64%±17,98% исходного мерзлотного углерода из проб Инты 1, Инты 11 и Колвы соответственно. В анаэробных условиях прогнозные оценки близки и указывают на незначительные величины 0,30...1,90% минерализованного ПОУ за 80 лет. Мы предполагаем, что даже при идеальных условиях инкубационного эксперимента, без учета экологической инерции в естественных условиях, а также при температуре вечной мерзлоты, близкой к нулю, эмиссия парниковых газов от исходного ПОУ значительно меньше расчетных. Ненарушенные бугристые болота являются резервуарами-поглотителями углерода на протяжении большей части своей истории, поэтому и в долгосрочной динамике в условиях климатических изменений их торфяные залежи будут устойчивы к деградации.

### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Исследование выполнено при частичной поддержке бюджетной темы № 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», а также благодаря поддержке программы развития университетов «Приоритет 2030».

Pastukhov, A.; Knoblauch, C.; Beer, C.; Ryzhova, I.; Kaverin, D. Development of permafrost-affected peatlands in the southern limit of the European Russian cryolithozone and their vulnerability to future warming. *Sci. Total Environ.* 2022, 828, 154350. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154350>.

## Радиальное распределение С, N, P в почвах мыса Чукочий (Северо-Восточная Якутия)

*Соболев Н.С.<sup>1</sup>, Лупачёв А.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

*e-mail: kolyhome2000@yandex.ru*

Установлено, что особенностью почв приморских низменностей Севера Якутии является наличие в них прослоев с высоким содержанием грубого органического вещества, в том числе, в составе многолетнемерзлых пород (Губин, Лупачёв, 2020). Органическое вещество, законсервированное в почвах и породах ледового комплекса Севера Якутии может оказывать существенное влияние на ход биогеохимических циклов углерода, азота и фосфора в этих ландшафтах.

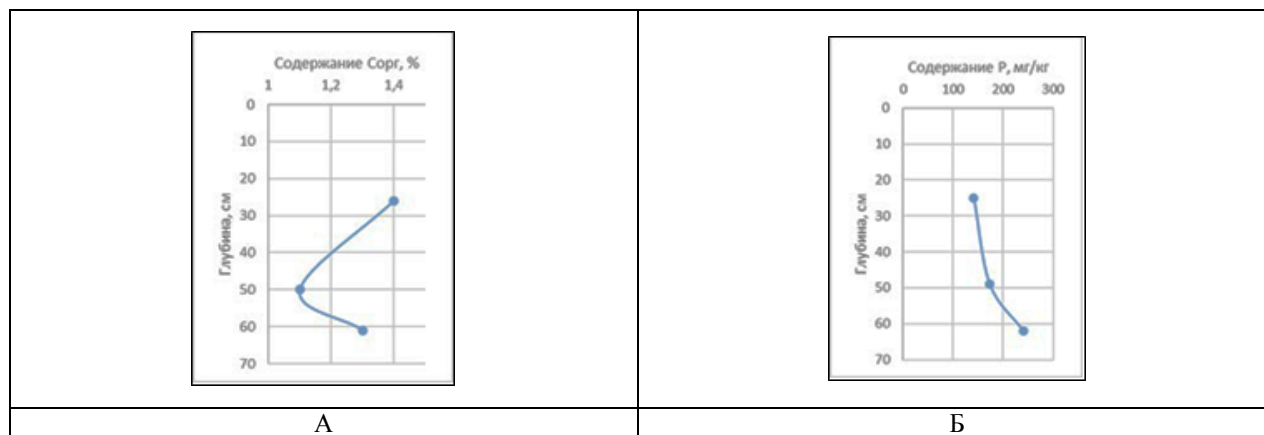
Целью работы является анализ радиального распределения С, N и P в почвах ледового комплекса приморских низменностей Севера Якутии.

Аналитические исследования образцов почв выполняли в ЦКП ИФХиБПП РАН. Содержание валового углерода (Собщ) и азота (Nобщ) в образцах определяли в лаборатории почвенных циклов азота и углерода ИФХиБПП РАН с помощью NCNS- анализатора (Leco 932, США). По разнице между содержанием Собщ и углерода карбонатов находили содержание органического углерода (Сорг). Подвижные фосфаты (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) определяли по методу Кирсанова. Для диагностики почвенных горизонтов и установление классификационного положения исследуемых почв использована Классификация и диагностика почв России [2004].

Ключевой участок находится в зоне северной тундры (координаты центра участка 70.066 с.ш., 159.872 в.д.). Основными породами, слагающими приморские низменности, являются отложения ледового комплекса. Рельеф представляет собой местами заболоченную равнину с многочисленными озёрами и речками, осложнённую озёрно-аласными котловинами. Климат – арктический [Алисов, 1936]. Среднегодовая температура составляет - 12,7 °С, среднегодовая норма осадков – 156 мм.

Объектами исследования являются почвы катены ключевого участка «мыс Чукочий» – криоземы грубогумусированные и типичные [Классификация..., 2004], находящиеся в разных ландшафтных позициях – от едомного водораздела через серию озерных террас к днищу озёрно-аласной котловины.

Органический углерод в основном имеет аккумулятивно-элювиально-иллювиальный (рис 1А.) и реже – регрессивно-элювиальный типы распределения по почвенным профилям. Большинству почв свойственен минимум по содержанию органического углерода в средней части профиля. Типы распределения отражают специфику почв изучаемого региона: основные биофильные элементы накапливаются в верхних горизонтах и достигают минимума в нижних частях профиля. Однако, поскольку исследуемые почвы развиваются на специфических отложениях ледового комплекса, которые содержат большое количество законсервированного органического углерода (чаще в виде детрита), то помимо максимума в верхней части профиля, который образуется в связи с биохимической активностью растений, также очень часто отмечается максимум в нижней части профиля. Он связан с унаследованием большого количества элемента от многолетнемерзлых отложений; не исключено и накопление органических остатков над мерзлотой в результате криотурбаций и барьерной функции мерзлоты для корней растений [Лупачев, Губин, 2012] и/или иллювиирования, называвшегося мерзлотной ретинизацией гумуса в середине прошлого века (рис. 1А).



**Рис. 1.** Графики радиального распределения органического углерода (А.) в профиле криозёма грубогумусированного (аккумулятивно-элювиально-иллювиальный тип) и подвижных фосфатов (Б.) в профиле криозёма типичного (регрессивно-элювиальный тип).

Подвижные фосфаты имеют некоторое сходство с органическим углеродом в плане распределения по профилю. Им также свойственны аккумулятивно-элювиально-иллювиальный и регрессивно-элювиальный (Рис 1Б) типы распределения. Однако, стоит заметить, что абсолютно во всех почвах максимальное значение фосфор принимает в нижней части профиля. Это связано с тем, что в отличие от углерода и азота, фосфор поступает в деятельный слой, главным образом, из почвообразующих пород, которые в данном конкретном случае обогащены фосфором. Закономерностей в радиальном распределении общего азота обнаружено не было.

Помимо специфики самих элементов и почвообразующих пород, на профильное распределение элементов влияют некоторые почвообразовательные процессы уникальные для исследуемой территории: процессы криотурбации, способствующие повышению содержания биофильных элементов в криотурбированном горизонте и обеднению ими остальных горизонтов. Также может проявляться наличие органогенного надмерзлотно-аккумулятивного горизонта CRO, в котором всегда имеют место максимумы содержания всех исследуемых элементов.

Кроме того, на радиальное распределение элементов косвенно могут влиять и другие факторы. Нахождение почвы на склоне в элювиально-аккумулятивной позиции способствуют лучшему дренированию поверхности и профиля, а следовательно – прогреванию толщи и ускорению процесса гумификации органического вещества, что непосредственно влияет на перераспределение биофильных элементов в верхней части профиля.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Работы выполнены при финансовой поддержке РФ (23-27-00242). Алисов Б.П. Климаты СССР. М.: Изд-во МГУ, 1956. 128 с

Губин С.В., Лупачёв А.В., Почвообразование в тундровой зоне приморских низменностей северо-востока Сибири // Почвоведение. – 2020. – № 10. С. 1182-1191.

Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Лупачев А.В., Губин С.В. Органогенные надмерзлотно-аккумулятивные горизонты криоземов тундр Севера Якутии // Почвоведение. 2012. № 1. С. 57–68.

## Влияние гидротермического режима на гетеротрофное дыхание торфяных почв севера Западной Сибири

*Трифонова В.А.<sup>1</sup>, Чуванов С.В.<sup>1,2</sup>, Тархов М.О.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Почвенный Институт им. В. В. Докучаева, Москва, Россия

*e-mail: victoriatrifonova04@gmail.com*

Принято считать, что почвы на границах распространения многолетнемерзлых пород подвержены резкой потере органического вещества ввиду изменения климата в сторону увеличения приземных температур. Примером процесса разрушения мерзлоты являются термокарстовые образования. Бугристые торфяники на границе зон северной тайги и южной тундры начинают протаивать при повреждении теплоизолирующего слоя торфа или потере растительного покрова. Стоит отметить, что термокарст является молодым образованием относительно системы «бугристый торфяник – термокарст – ложбина стока», замкнутым и не связанным с ложбиной.

В течение двух полевых сезонов 2021–2022 гг. методом закрытых камер были измерены эмиссия  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  с поверхности почв с двух термокарстов. Почвы термокарстов и почвы бугристого торфяника представлены одним и тем же типом торфа, но гидротермические условия резко отличаются. Разница в значениях объемной влажности составляла порядка 20–25%, температура почв отличается на 7–13°C. При значительных отличиях в гидротермическом режиме ожидаемо, что эмиссия будет возрастать при переходе к «оптимальным» условиям – более теплым и влажным. Однако, как показывают результаты двухлетних исследований, резкого увеличения дыхания почв не происходит (рис. 1). Наоборот, значения эмиссии внутри термокарстовых образований оказались меньше, чем на нарушенном участке.

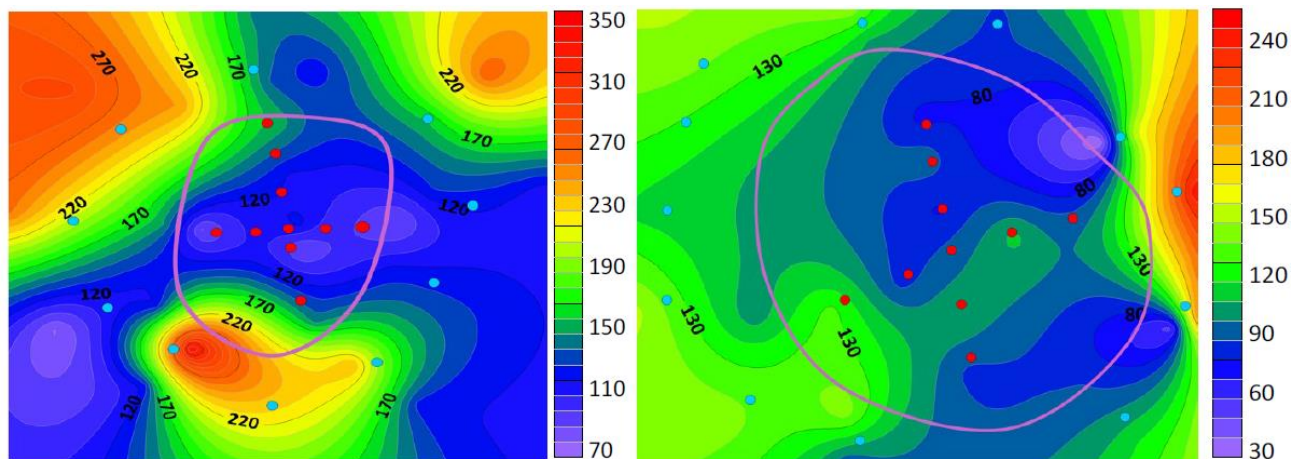


Рис.1. Эмиссия  $\text{CO}_2$  ( $\text{mg C-CO}_2/\text{m}^2/\text{час}$ ) с поверхности почв термокарстов.

В поле действует множество разнонаправленных факторов, которые мешают оценить вклад температуры и влажности в поток углерода. В данном случае стоит предположить, что эмиссия с поверхности почв термокарста ограничена анаэробными условиями (о чем косвенно говорит эмиссия метана). Повышенная эмиссия на бугристом торфянике может быть связана с наличием мерзлоты и отсутствием оттока  $\text{CO}_2$  вглубь почвенного профиля и подтоком легкодоступного органического вещества с таящего сезонно-талого слоя. Более того, при полевых измерениях довольно трудно отделить автотрофное дыхание почв от гетеротрофного почв ввиду обилия кустарничков на бугристом торфянике и отсутствии таковых на термокарсте. На данный невозможно судить о роли температуры и



влажности в многофакторной системе данного экотона, необходимы дальнейшие многолетние исследования с большей выборкой числа термокарстов.

В лаборатории проводились исследования по двум верхним горизонтам термокарста (торфяная олиготрофная) и трем горизонтам почвы бугристого торфяника (тофяно-криозем). Эксперимент проводился через неделю после полевого опыта, образцы естественной влажности инкубировались при температуре 25°C.

Образец почвы	Гетеротрофное дыхание (среднее $\pm$ ош. среднего)
ТО1(10-30 см) Бугристый торфяник	1,64 $\pm$ 0,03
ТО2 (30-60 см) Бугристый торфяник	1,33 $\pm$ 0,13
CRM (60-70 см) Бугристый торфяник	2,99 $\pm$ 0,10
ТО1 Термокарст	7,65 $\pm$ 0,82
ТО2 Термокарст	6,62 $\pm$ 0,05

**Табл. 1.** Гетеротрофное дыхание образцов торфа почв термокарста и бугристого торфяника (мкг С-СО<sub>2</sub>/г почвы/час)

Статистически значимо показано, что верхние горизонты почв обласадают большими показателями гетеротрофного дыхания, чем нижние, однако, при резком оттаивании многолетнемерзлых пород наблюдается резкое увеличение дыхания образцов. При сравнении с почвами термокарста, дыхание образцов мерзлоты имеет меньшие значения. В данной системе решающим фактором является наличие доступного углерода, для почв термокарста его количество было большим, чем у почв бугристого торфяника. Мерзлый горизонт при таянии освобождает дополнительное количество органического вещества углерода.

В лабораторных условиях измерения проводятся с наименьшим числом факторов, но на данный момент нельзя судить обо всей по отдельно взятым образцам. Лабораторные данные показывают, что потенциальный рост эмиссии в поле должен происходить за счет почв термокарстов и, в меньшей степени, за счет таяния мерзлоты. Однако, система бугристый торфяник-термокарст обладает большой буферностью и резкого увеличения эмиссии не происходит. В ближайшее время не стоит ожидать срабатывания «углеродной бомбы» от торфяных почв севера Западной Сибири.

## Удельные потоки метана из болотных экосистем севера Западной Сибири

*Устинов Н.Б., Кривенко Л.А., Казанцев В.С.  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
e-mail: NikUstinov@yandex.ru*

Метан (CH<sub>4</sub>) относится к малым газовым составляющим атмосферы. В приземном слое воздуха его содержится в ~230 раз меньше, чем диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), однако CH<sub>4</sub> имеет в 28–34 раза больший потенциал глобального потепления, что делает его вторым по значимости парниковым газом после CO<sub>2</sub>. Одним из ключевых источников метана являются болотные экосистемы, на долю которых приходится 18–21% глобальных эмиссий CH<sub>4</sub> [РСС, 2021]. Крупнейшее на планете средоточие болот, вносящее существенный вклад в атмосферный бюджет CH<sub>4</sub>, находится в Западной Сибири.

Исследования продолжались с 8 июля по 12 августа 2018 года в Приуральском районе Ямало-Ненецкого автономного округа (подзона южной тундры). Удельные потоки метана (УПМ) измерялись в предгорьях Полярного Урала (ключевые участки «Южный», N 66.98°, E 66.63°, «Центральный», N 67.48°, E 66.99°, и «Северный», N 67.95°, E 67.54°) и на побережье Байдарацкой губы (ключевой участок «Побережье», N 68.86°, E 66.71°). Замеры проводились на двух сфагново-осоковых болотах на разных берегах реки на ключевом участке «Южный» (16 УПМ на 6 точках), на пушицево-моховом болоте на участке «Центральный» (12 УПМ на 4 точках), на полигональном болоте на левом берегу термокарстового озера Панда на участке «Северный» (18 УПМ на 5 точках) и на полигональном болоте на участке «Побережье» (10 УПМ на 4 точках). Данные для расчёта УПМ были получены камерно-статическим методом [Глаголев и др., 2010]. В течение 30 минут из камеры через равные промежутки времени отбирались 4 пробы воздуха в герметичные стеклянные флаконы, предварительно заполненные насыщенным раствором NaCl. Каждому камерному измерению сопутствовало определение приземной скорости ветра, температуры воздуха и атмосферного давления (портативная метеостанция Skywatch GEOS N11, JDC Electronic SA, Швейцария), уровня болотных вод (УБВ) и их водородного показателя (портативный анализатор Hanna HI 98129, Hanna Instruments, Румыния).

Концентрации метана в отобранных пробах определялись на газовом хроматографе «Кристалл 5000.2» (ЗАО «Хроматэк», г. Йошкар-Ола) с пламенно-ионизационным детектором. Величины УПМ рассчитывались линейно-регрессионным методом (Глаголев и др., 2010). Отрицательные УПМ ниже предела поглощения метана почвой ( $-0.4 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$  согласно (Glagolev et al., 2022)) исключались из выборки. Для каждого из ключевых участков рассчитаны статистические характеристики УПМ (табл. 1, рис. 1, А).

Ключевой участок	Точек, соответствующих сухим/ среднеувлажненным/влажным участкам	УПМ, $\text{мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ , I квантиль/медиана/III квантиль
«Южный»	3/3/0	0.13/0.02/0.05
«Центральный»	0/2/2	0.28/2.92/4.23
«Северный»	2/0/3	0.04/2.42/3.23
«Побережье»	2/0/2	-0.04/0.40/1.57

Табл. 1. Обводненность ключевых участков и статистические характеристики УПМ.

Точки камерных измерений на всех ключевых участках были классифицированы по обводненности в зависимости от УБВ и форм болотного ландшафта (табл. 1). Сухими элементами ландшафта считались бугры пучения и прочие микроповышения,

среднеувлажненными – микропонижения и слабо обводненные мочажины, влажными – сильно обводненные мочажины. Для участков различной обводненности были рассчитаны статистические характеристики УПМ (табл. 2, рис. 1, Б).

Элементы ландшафта	УПМ, $\text{мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ , I квартиль/медиана/III квартиль
Сухие	-0.14/0.02/0.14
Среднеувлажненные	0.04/0.24/1.03
Влажные	2.34/2.84/4.35

Табл. 2. Статистические характеристики УПМ для элементов ландшафта с различной обводненностью.

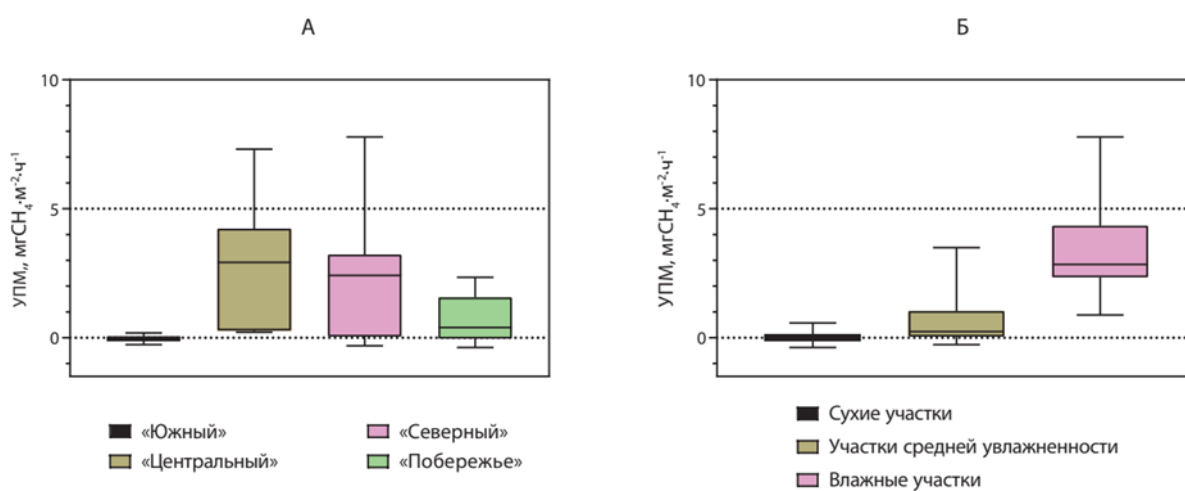


Рис. 1. Статистические характеристики УПМ:

А – для ключевых участков; Б – для элементов ландшафта с различной обводненностью.

Концы усов показывают размах выборок после исключения выбросов, нижние и верхние границы ящиков – I и III квартили, горизонтальные линии внутри ящиков – медианные значения.

Величины УПМ положительно коррелируют с обводненностью исследованных болотных экосистем. УМП максимальны на влажных элементах ландшафта и снижаются по мере уменьшения обводненности до околонулевых значений на сухих элементах ландшафта. Величины УПМ убывают при движении с юга на север (ключевые участки «Центральный», «Северный» и «Побережье» со сходным распределением точек измерений по обводненности), однако значения на участке

«Южный» выбиваются из зонального тренда ввиду низкой обводненности на момент исследования находящихся там сфагново-осоковых болот.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Исследование проведено в рамках темы государственного задания 1022030400001-9.

Glagolev M.V., Suvorov G.G., P'yasov D.V., Sabrekov A.F. and Terentieva I.E. What is the maximal possible soil methane uptake? // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2022, Vol. 13., No. 3, pp. 123–141. DOI: 10.18822/edgcc133609

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA, 2391 pp.

Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва - атмосфера. Томск: ТГПУ, 2010. 104 с.

## Влияние геокриологических условий на эмиссию парниковых газов почвами торфяно-болотного комплекса на севере Западной Сибири

*Чуванов С.В.<sup>1,2</sup>, Матышак Г.В.<sup>2</sup>, Трифонова В.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Почвенный институт им В. В. Докучаева, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им М. В. Ломоносова, Москва, Россия*  
*e-mail: stas.chuvanov@gmail.com*

Изменение климата ускоряет таяние многолетнемерзлых пород (ММП) на Крайнем Севере. ММП регулирует почвенный дренаж, температуру почв, увеличивает неоднородность почвенного покрова. Наличие ММП радикально влияет на свойства почв, создавая контрастные условия для их развития. Таяние мерзлоты может привести к повышению температуры почвы, активизировать минерализацию законсервированного углерода и значительно изменить влажность почв. Влажность почв может как существенно увеличиться, так и уменьшиться. Сухие участки почвы могут стать дополнительным источником CO<sub>2</sub> в результате минерализации органического вещества, тогда как переувлажнение участков почвы снижает эмиссию углекислого газа, но увеличивает эмиссию метана. При этом оба процесса усиливают парниковый эффект. Целью работы было оценить как изменение климата и таяние ММП может повлиять на пространственную неоднородность влажности и температуры почв, эмиссию CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>.

Исследованный торфяно-болотный комплекс расположен на севере Западной Сибири (ЯНАО, Надымский район) в зоне северной тайги. Для изучения выбран плоскобугристый торфяник, площадью около 200–300 м<sup>2</sup> (65°18'52.0" N, 72°52'32.5" E) с комплексом почв – торфяно-криоземов и торфяных олиготрофных деструктивных почв и окружающее его олиготрофное болото с типичными торфяными олиготрофными почвами. Обе экосистемы отличаются по геокриологическим условиям. В августе 2022 г. по регулярно-случайной сетке с шагом 1-2 м оценивали пространственную вариабельность глубины протаивания методом щупа, температуры, объемные влажности почв, эмиссии CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> методом закрытых камер.

Олиготрофные почвы болот характеризовались отсутствием ММП (на глубине до 2 м), тогда как глубина протаивания почв плоскобугристого торфяника составляла в среднем 0,66 ± 0,25 м. Температура и влажность олиготрофных почв была в среднем в два раза выше, чем у почв плоскобугристого торфяника (12,53 ± 0,96°C и 6,66 ± 1,91°C; 66,65 ± 1,67% и 28,85 ± 15,28%, соответственно). Эмиссия CO<sub>2</sub> из олиготрофных почв болота и из почв плоскобугристого торфяника достоверно не различалась, составив 174,12 ± 89,82 и 167,9 ± 60,38 мг CO<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> час<sup>-1</sup>, соответственно. Эмиссия метана из почв олиготрофного болота в 30 раз превышала эмиссию из почв плоскобугристого торфяника (5,72 ± 4,72 мг CH<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> час<sup>-1</sup> и 0,19 ± 0,03 мг CH<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> час<sup>-1</sup>, соответственно). Таким образом, ММП значительно влияют на пространственную неоднородность и величину гидротермических параметров почв по сравнению с экосистемой без ММП. Наличие мерзлоты во много раз снижает эмиссию метана за счет перехода почв из гидроморфных условий в полугидроморфные или даже автоморфные. При этом наличие или отсутствие ММП не повлияло на эмиссию CO<sub>2</sub>. Это может быть связано с такими факторами, как: 1) физические процессы перераспределения потоков углерода по столу мерзлоты в близлежащие болотные экосистемы; 2) для болотной экосистемы наличие метанотрофного барьера, который увеличивает общую продукцию CO<sub>2</sub> из переувлажненной экосистемы; 3) широкий оптимум влажности для микробиологической активности в торфяных почвах; 4) разнонаправленное влияние температуры и влажности почв.

### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-24-00020 «Влияние влажности на биологическую активность торфяных почв криолитозоны».

## КРУГЛЫЙ СТОЛ: «ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИИ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ, В Т. Ч. НА ПРИМЕРЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ КИДПР, WRB И USDA ST»

---

### Положение мерзлотных почв в классификации почв России: проблемы и возможные решения

*Герасимова М.И.<sup>1</sup>, Лупачев А.В.<sup>2</sup>, Губин С.В.<sup>2</sup>, Горячкин С.В.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*

<sup>3</sup>*Институт географии РАН, Москва, Россия*

*e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com*

В последние годы продолжается обсуждение классификации почв России после издания в 2008 г. «Полевого определителя почв России», в том числе мерзлотных почв. Мерзлотные или криогенные почвы - термины, принятые как общие неклассификационные по О.В. Макееву и И.А. Соколову, занимают все более значительное место в очередных «приближениях» классификации и диагностики почв России [2008]. Н.Б. Хитровым и М.И. Герасимовой были учтены предложения С.В. Горячкина [2010] и результаты on-line дискуссии, проведенной по инициативе почвоведов ИФХиБПП, посвященной криогенным почвам в формате КиДПР в переработанной Части I КиДПР для следующего «приближения» [Сайт Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева: <http://www.esoil.ru/publications/books.html>]. Накопившаяся таким образом информация позволила разделить имеющиеся представления о мерзлотных почвах в идеологии КиДПР на общие и собственно диагностические в отношении горизонтов, признаков и почвообразующих пород. Меньшую часть представлений можно считать принятой, большая часть остается дискуссионной. Последние являются темой и задачей данного сообщения.

#### Общие положения.

1. Мерзлотные почвы – отделы, типы, подтипы – представлены в КиДПР на разных уровнях в зависимости от свойств почв и положения мерзлоты. К собственно мерзлотным отнесены почвы криогенного отдела с залеганием мерзлоты в пределах первого метра. Отдел состоит из *криоземов* – почв с криогенным, как правило, водонасыщенным горизонтом CR, в диагностике которого приоритетны проявления криотурбаций в виде нарушений горизонтов, а также гомогенизации профиля.

Предлагается рассмотреть радикальное решение: в отдел криогенных почв, кроме имеющихся типов криоземов, ввести *криоглееземы*, как гидроморфные члены ряда криогенных почв и *криотурбоземы*, как наиболее дренированные почвы ряда, в которых различимы перемещенные морфоны почвенных горизонтов; криоземы занимают промежуточное положение. Разделение криоглееземов, криоземов и криотурбоземов на типы осуществляется по комбинациям горизонта CR с верхними (T, H, O, W, AO, AH) и срединными (CR, G, TUR, возможно, CRM) горизонтами.

Квалификатор *мерзлотный* может использоваться на уровне подтипа для любых почв кроме криоземов (по умолчанию), а также при необходимости для криоаридных и криометаморфических почв. При залегании мерзлоты в толще от 1 до 2 м и глубже 2 м, почвы классифицируются как глубоко-мерзлотные и глубинно-мерзлотные на уровне рода,

соответственно. Наличие криотурбаций отмечается символом @ в любых почвах, где они имеются, кроме криогенных и криотубированных (по умолчанию).

*Криометаморфические почвы* с горизонтом CRM формируются как при наличии мерзлоты (глубже 1 м), так и без нее при частых переходах температуры через 0°C и влажности почвы, близкой к НВ. Подтиповой признак *сгп* возможен в разных почвах.

2. *Почвообразующие породы*. Раздел КиДПР о почвообразующих породах, нередко и справедливо отмечаемый как неудачный в КиДПР, был изменен, в частности, добавлен лёд (ICE) как почвообразующая порода, например, на леднике и на глыбе мертвого льда. Льдистая мерзлота может обозначаться как PMF или традиционно как ММП? Желательны уточнения определения, введение малольдистой мерзлоты и соответствующих символов, с учетом также времени описания разреза.

3. *Новые почвы*. С.В. Губиным и А.В. Лупачевым предлагается ввести в КиДПР группу почв морских побережий, в т.ч. в криолитозоне. Объекты рассмотрения, предварительно названные «талассосоли», распределяются между тремя стволами, в которых нужны новые отделы. В стволе первичного почвообразования – отдел слабо развитых маршевых почв; в стволе органогенного почвообразования – отдел аллохтонных органогенных почв, тип маршевых; в стволе синлитогенного почвообразования – отдел маршевых почв. Все варианты горизонтов и признаков маршевых почв обозначаются символом %.. Название почв требует дополнительного обсуждения. Целесообразность развития классификации почв маршей очевидна, но она должна в большей мере учитывать свойства почв: результатов динамичных комбинаций засоления, глеевых, восстановительных, органо-аккумулятивных и криогенных процессов.

#### **Диагностика почв.**

1. *Диагностические горизонты*. В новой редакции Части I уточнены определения горизонтов: *криогенного (CR)*, *криометаморфического (CRM)*, *криогумусового (AK)*; расширены их характеристики в соответствии с предлагаемой новой схемой описания горизонтов. Определение горизонта CR согласовано в ходе дискуссии, и включает как свойства профиля, так и особенности микрорельефа дневной поверхности. Горизонт АК подробно изучен группой исследователей во главе с М.А. Бронниковой и обоснована его диагностика.

Остается неясной целесообразность сохранения *гумусово-криометаморфического* горизонта CRH в основном по причине недостатка информации о его свойствах и ареалах, возможно перевести горизонт на уровень признака. Дискуссионным остается введение в КиДПР горизонта *надмерзлотно-органо-аккумулятивного CRO*, предлагаемого А.В. Лупачевым и С.В. Губиным; одним из возражений является необходимость введения нового типа криоземов. Требуется дополнительное подтверждение масштабов пространственного распространения почв с этим горизонтом.

2. *Диагностические признаки*. К криоземам, криометаморфическим и криоаридным почвам успешно применяются «обычные» признаки, используемые для почв немерзлотных территорий, такие как глееватые, оксиглееватые, карбонатные, засоленные и другие. Однако целесообразно введение специальных признаков, характеризующих и/или детализирующих проявления криогенных процессов. Часто они являются если не эфемерными, то временными, и по этой причине могут быть отнесены на уровень рода. Предлагаются признаки, связанные с трещинообразованием: *криоязыковатый* и с двумя основными механизмами образования пятен: *криоабрадированные* и *криостратифицированные*, а также с солифлюкцией. Предлагаются следующие признаки: подтиповой – *криосортированный* для поверхностных образований типа каменных колец и скоплений щебня внутри профиля, и признак на уровне рода – *тиксотропный*. Перевод в признаки горизонта CRO и сравнение его с известными проявлениями ретинизации позволили бы предложить более общий подход к процессам надмерзлотной аккумуляции веществ, как функционирования мерзлотного геохимического барьера. Предлагаются квалификаторы: *надмерзлотно-ретинизированный*,

*надмерзлотно-глееватый, надмерзлотно-карбонатный, надмерзлотно-засоленный* в  
дополнение к *надмерзлотно-органо-аккумулятивному* сго.

*Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера. М.: ГЕОС. 2010. 414 с.

Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. 2008. 182 с.

Сайт Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева: <http://www.esoil.ru/publications/books.html>

## Генезис, проблемы классификации почв побережий Баренцева и Печорского морей

*Денёва С.В., Шамрикова Е.В., Кубик О.С.*

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия*

*e-mail: deneva.18.08.1962@yandex.ru*

Государственный и общественный интерес к научному обеспечению деятельности в Арктике вообще и в зоне Северного морского пути в частности определяют необходимость комплексного познания наземных экосистем высоких широт. Расширяется хозяйственная деятельность: строительство портов и нефтяных терминалов, геофизическая разведка, освоение новых районов промысла. Актуальность работ возрастает и из-за происходящей и прогнозируемой трансформации природной среды. Вызовы современности неизбежно отразятся на перераспределении элементов между составными компонентами экосистем. В этой связи сведения о современном экологическом состоянии почвенного покрова становятся фундаментом для оценки направленности продукционных и деструкционных процессов арктической зоны.

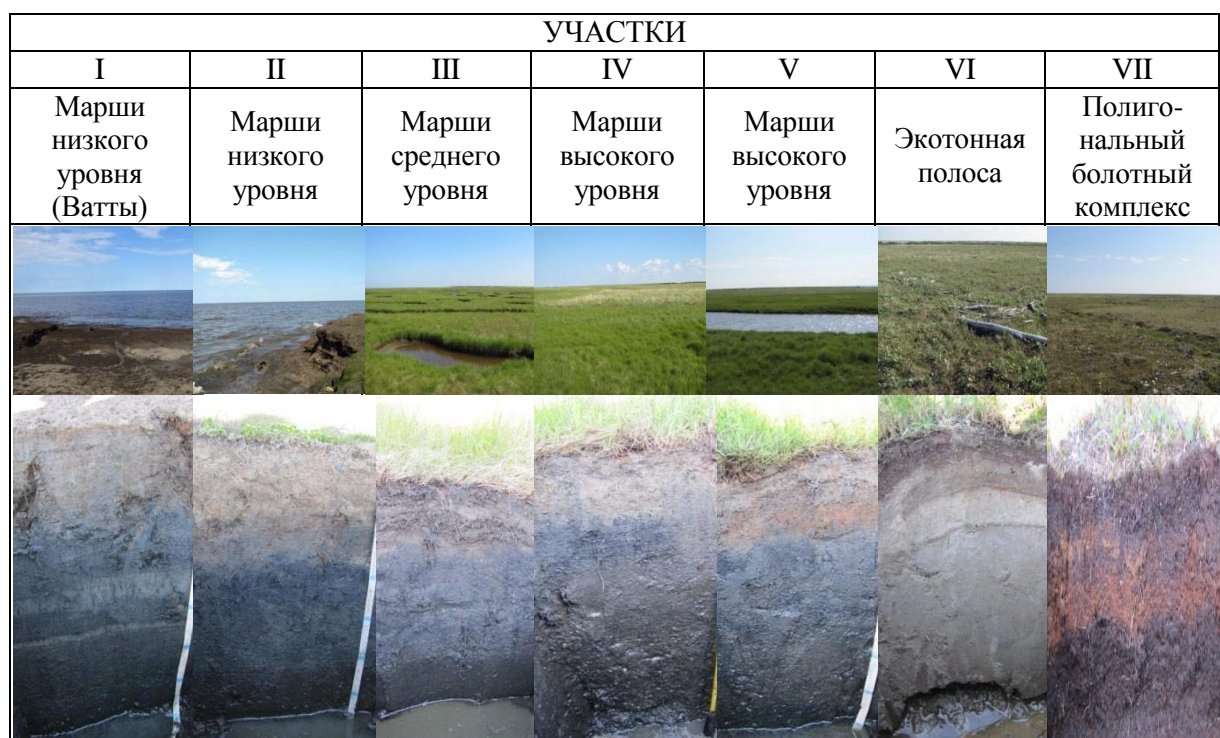
Высокую пестроту почвенного покрова северных континентальных окраин и, как следствие, существенную геохимическую контрастность в содержании элементов обуславливает многообразие комбинаций факторов приморского педогенеза (тип берега, засоление, седиментогенез, криогенез, глеегенез, орнитогенез и др.).

Систематика и номенклатура названных объектов остается дискуссионной проблемой. Отсутствие официально принятой классификации, где азональные прибрежные почвы выделены в качестве единой ассоциации, затрудняет их полевую диагностику. Вследствие своеобразного водного питания и оригинального солевого состава подобные объекты, на наш взгляд, не целесообразно объединять с континентальными аналогами. Для приморских почв необходима единая самостоятельная классификационная единица на типовом уровне. Очевидной также является актуальность разделения прибрежных почв, существенно различающиеся по генезису, на 1) засоленные маршевые, формирующиеся в условиях периодического затопления приливными и нагонными морскими водами (*синлитогенные*), и 2) почвы тундровых и болотных экосистем, развитые на наиболее высоких позициях рельефа и подверженные влиянию моря лишь посредством выпадения морских аэрозолей и/или подпитки почвенно-грунтовыми водами (*миритимные*) (Шляхов, 1996). При неоднозначном проявлении процессных признаков в разных по составу и глубине залегания слоях уместным видится разъединение почв на уровне подтипов по наличию оглеения и криотурбаций, мерзлоты и стратифицированных слоев, мощности гумусово- аккумулятивных горизонтов, признаков жизнедеятельности птиц и др.

Отметим некоторые общие закономерности, выявленные в ходе многолетних исследований прибрежных почв Баренцева и Печорского морей. Характерным является наличие семи однотипных участков, находящихся на разном расстоянии от кромки морской воды (рис. 1). На выровненных аккумулятивных берегах вглубь материка отмечено последовательное снижение суммы талассофильных (Na, Mg, Cl) и пропорциональный рост литофильных (Ca, Al, Fe, Mn) элементов. Специфика геохимических потоков веществ почв низких маршей Хайпудырской губы (большая соленость морских вод, более суровый климат), в сравнении с аналогичными позициями побережья Кандалашского залива Беломорья, определяет повышенную засоленность. Отмечено 2-4-кратное превышение содержания растворимых форм  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и превосходящий размах вариабельности показателей первых. Характерным признаком прибрежных тундровых почв, формирующихся на высоких позициях рельефа и испытывающих воздействие морских аэрозолей, является накопление растворимых катионов (до двух раз) относительно аналогичных почв материка. На распределение элементов по профилю таких почв существенное влияние оказывают импัลверизация солей и условия мерзлотного режима –



сочетание нисходящего и восходящего массопереноса. Во всех почвах геохимическими барьерами, ограничивающими нисходящую миграцию элементов, выступают мерзлые горизонты. В составе суммарного пула углерода и азота (5-400 и 0.3-20 г/кг) маршевых и тундровых почв доминируют органические формы. Для первых установлена аккумуляция  $C_{op}$ ,  $N_{op}$  в поверхностных горизонтах профиля, в почвах водоразделов – обогащение срединных горизонтов  $N_{op}$ , включая мерзлые слои торфа. Выявлена связь содержания  $C_{op}$  и  $N_{op}$  в почвах и водных вытяжках из них с аналогичными показателями биомассы доминантов современных растительных сообществ. В почвах маршей главными источниками углерода неорганических соединений различной растворимости являются морская вода и карбонатные почвообразующие породы.



**Рис.1.** Почвы побережья Печорского моря:

- I – маршевая стратифицированная гитиевая иловато-глеевая мерзлотная (Tidalic Fluvisol (Gelic, Loamic, Endoprotosalic));  
 II – маршевая слабо развитая слоистая гумусово-стратифицированная мерзлотная (Gleyic Tidalic Fluvisol (Gelic, Loamic, Ochric));  
 III – маршевая гумусово-глеевая мерзлотная (Gleyic Tidalic Fluvisol (Endocryic, Loamic, Epirotosalic));  
 IV – маршевая гумусово-глеевая потечно-гумусовая мерзлотная (Gleyic Tidalic Fluvisol (Gelic, Epirotosalic));  
 V – маршевая гумусово-глеевая окисленно-глеевая мерзлотная (Gleyic Subaquatic Tidalic Fluvisol (Gelic, Loamic, Epirotosalic));  
 VI – маршевая гумусово-глеевая грубогумусированная криотурбированная мерзлотная (Gleyic Fluvisol (Turbic Gelic, Loamic, Epirotosalic));  
 VII – торфяная олиготрофная мерзлотная (Folic Epicryic Histosol).  
*Фото выполнены к.б.н. С.В. Деневои.*

#### БЛАГОДАРНОСТЬ.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 122040600023-8.

## **КРУГЛЫЙ СТОЛ ПО ПРИКЛАДНЫМ ВОПРОСАМ: «ЗНАНИЯ И ДОСТИЖЕНИЯ КРИОПЕДОЛОГИИ – СОВРЕМЕННОМУ ОБЩЕСТВУ»**

---

### **Организация почвенных исследований в ООО «Газпром проектирование» в ходе выполнения инженерно-экологических изысканий**

*Аверьянов А.А., Бунина О.А.  
ООО «Газпром проектирование», Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: aaverianov@proektirovanie.gazprom.ru*

Газификация регионов РФ и развитие экспортного потенциала нефтегазовых ресурсов нашей страны являются одними из наиболее приоритетных целей группы компаний ПАО «Газпром». Их достижение неразрывно связано с реализацией крупных инвестиционных проектов в сферах разведки и добычи природного газа, его транспортировки, подземного хранения, переработки и поставки конечному потребителю. Отраслевая специфика газовой промышленности, связанная с локализацией мест добычи и разветвлённостью маршрутной сети объектов газотранспорта и газораспределения, обуславливает необходимость активного хозяйственного освоения природных ландшафтов, в том числе хрупких экосистем Крайнего Севера. Обеспечение условий снижения негативного воздействия на окружающую среду входит в обязательства компании, закреплено экологической политикой ПАО «Газпром» и в полной мере реализуется на всех этапах проектно-изыскательских работ (далее — ПИР), выполняемых ООО «Газпром проектирование».

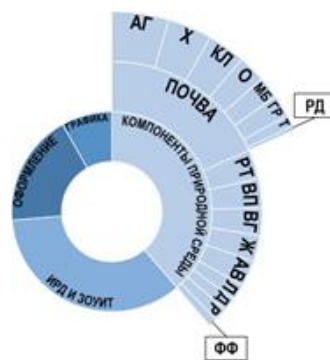
Проектный институт выступает ведущим разработчиком проектов организации строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов газовой инфраструктуры в РФ. Согласно действующим нормативным требованиям, с учетом ст. 47 Градостроительного кодекса, все принимаемые проектные решения обязаны быть обеспечены достоверными сведениями о природной среде, в том числе результатами исследования почвенного покрова в пределах планируемого контура землеотвода и зоны возможного влияния объекта.

Практическое изучение в полевых условиях территории будущего освоения осуществляется в ходе инженерно-экологических изысканий (далее — ИЭИ), в составе комплекса работ по изучению природных условий зоны планируемого строительства. Специфика объектов газовой инфраструктуры обуславливает необходимость проложения трасс и выбора площадок строительства в разнообразных почвенно-географических зонах. Результаты почвенных исследований оказывают непосредственное влияние на принятие проектных решений: обоснование процедур снятия и сохранения плодородного слоя почвы, рекультивационные мероприятия, утилизацию загрязненных грунтов на специализированных полигонах.

Принимая во внимание сложность и всестороннюю значимость почвы для ПИР, в структуре ООО «Газпром проектирование» представлены подразделения, осуществляющие почвенные исследования и использующие их результаты, в том числе изыскательский, лабораторно-аналитический и проектный блоки. Это позволяет минимизировать ошибки на всех стадиях реализации инвестиционного проекта: составления задания и программы работ (далее — ЗиПр), выполнения полевых и камеральных работ, экологическом проектировании, прохождении многоуровневой проверки результатов ИЭИ в рамках внутреннего и внешнего контроля, ведомственной, экологической и государственной экспертизы.

Масштабность и необходимость синхронного выполнения работ, проводимых ООО «Газпром проектирование», обуславливает привлечение субподрядных организаций для реализации ПИР в дополнение к собственным силам компании. Результаты выполненных субподрядными организациями работ проходят обязательную приемку службой технического контроля в целях выявления и устранения несоответствий отчетной документации требованиям ЗиПр, корпоративных и законодательно установленных нормативных документов.

Целью данного исследования являлось определение проблемных вопросов в ходе выполнения почвенных исследований в составе ИЭИ субподрядными организациями. Для этого был проанализирован массив фактически выданных службой технического контроля замечаний к результатам ИЭИ по объектам, располагающимся в криолитозоне, в пределах ЯНАО и ХМАО, и за ее пределами, на участке, проходящем через Волгоградскую область. По результатам трёхэтапной иерархической сегментации материалов приемки службы технического контроля, включающих 1175 замечаний к отчетной документации, установлено, что несоответствия в части исследований почвенного покрова занимают существенную долю: от общего пула — 18,3% и 47% от замечаний к результатам исследований компонентов природной среды (рис.1). Данное распределение проявляется не только при общем сегментировании замечаний, но и при их анализе для каждого объекта в отдельности, несмотря на их отличающиеся технические характеристики и различное географическое положение.



**Рис. 1.** Распределение замечаний к отчетной документации по ИЭИ

(ИРД И ЗОУИТ – исходно-разрешительная документация и зоны с особыми условиями использования территорий, РТ – растительность, ВП – поверхностные водные объекты, ВГ – грунтовые воды, Ж – животный мир, АВ – атмосферный воздух, Л – ландшафт, Д – донные отложения, Р – радиационный фон, ФФ – физические факторы, АГ – агрохимические исследования, Х – химические исследования, КЛ – классификационные вопросы, О – оформление, МБ – микробиологические исследования, ГР – графическая часть, Т – токсикологические исследования, РД – радиологические исследования)

Анализ замечаний демонстрирует, что наибольшую сложность для исполнителей ИЭИ вызывает агрохимическое направление с тесно сопутствующими ему задачами достоверного определения границ почвенных горизонтов и классификационной принадлежности почвенных разностей для последующего установления наличия или отсутствия плодородного слоя почвы. Комплекс мероприятий по снятию, сохранению, транспортировке, реализации и рекультивации плодородного и потенциально плодородного слоев почвы относится к одним из наиболее важных проектных решений в контексте влияния хозяйственного освоения ландшафта на экосистему. Порядок действий по определению его мощности и ареалов снятия детально описан в нормативной документации, в общих правилах производства работ по ИЭИ — СП 502.1325800.2021, а корректность его выполнения находится под пристальным вниманием экспертных организаций (включая ФАУ «Главгосэкспертиза России»).

В связи с тем, что в большинстве организаций — исполнителей ИЭИ полевые работы и камеральная обработка материалов осуществляются специалистами комплексного экологического профиля, актуальным является необходимость более детального освещения вопросов классификации почв в рамках соответствующих образовательных программ основного и дополнительного образования.

## КРУГЛЫЙ СТОЛ: «ОРГАНИЗАЦИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ РАБОТ НА КАРБОНОВОМ ПОЛИГОНЕ «СЕМЬ ЛИСТВЕННИЦ», ЛАБЫТНАНГИ»

### Создание национальной сети наблюдений за эмиссией CO<sub>2</sub> из почв в рамках реализации ВИП ГЗ: перспективы и первые результаты

*Курганова И.Н.<sup>1</sup>, Лопес де Гереню В.О.<sup>1</sup>, Хорошаев Д.А.<sup>1</sup>, Ильясов Д.В.<sup>2</sup>*

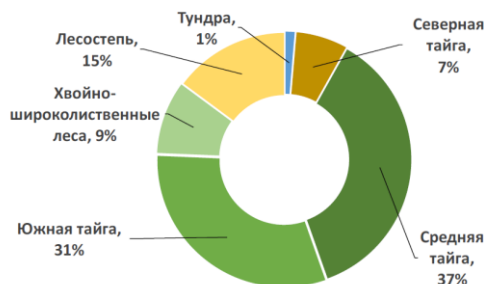
<sup>1</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия*

<sup>2</sup>*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия*

*e-mail: ikurg@mail.ru*

Эмиссия CO<sub>2</sub> из почв в атмосферу, которая складывается из дыхания корней растений, почвенной микро-, мезо- и макрофауны, представляет собой естественный источник углекислого газа, который почти на порядок превышает то количество CO<sub>2</sub>, которое выделяется в результате сжигания ископаемого топлива. Кроме того, определение эмиссионной составляющей углеродного цикла наряду с поглощением углекислого газа в процессе фотосинтеза, необходимо для количественной оценки баланса углерода в экосистеме. Поэтому, создание сети мониторинговых наблюдений за эмиссией CO<sub>2</sub> из почв является одной из приоритетных задач, которые решаются в рамках реализации Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ).

К настоящему времени собрана детальная информация о действующих площадках наблюдений за эмиссией CO<sub>2</sub> из почв на территории РФ, включающая географические координаты, климатические характеристики, сведения о биоклиматической зоне, типе БГЦ и типе почвы, методах и периоде измерения эмиссии CO<sub>2</sub>, имеющейся приборной базе и т.д. Общее количество площадок наблюдений за эмиссией CO<sub>2</sub> в 2022 г. составляет 76, из которых более 85–90% – это действующие площадки, а оставшаяся часть площадок относится к тем, где наблюдения за эмиссией CO<sub>2</sub> были прерваны по той или иной причине. Продолжительность наблюдений на разных площадках колеблется от 2–3 до 25 лет. Коллективы исследователей, которые проводят мониторинг эмиссии CO<sub>2</sub> из почв в большинстве своем оснащены необходимым оборудованием, но на многих площадках инфраструктурная и техническая база устарела и требует модернизации. В рамках реализации ВИП ГЗ проводится обновление инфраструктурной и технической базы уже существующих площадок, а в 2023 г. будет организовано еще 40 новых мониторинговых площадок для расширения сети наблюдений за эмиссией CO<sub>2</sub> из почв. Распределение площадок наблюдений по природно-климатическим зонам неравномерное (рис. 1)



**Рис. 1.** Распределение площадок наблюдений за эмиссией CO<sub>2</sub> из почв по основным биоклиматическим зонам России.

Так, в средне-таежной и южно-таежной подзонах таежной зоны располагается 37 и 31% от общего числа мониторинговых площадок, соответственно. В тундровой зоне размещается всего одна площадка, а в степной и полупустынной зонах наблюдения не ведутся совсем. Распределение площадок наблюдений по типам экосистем также крайне неравномерное (рис. 2). Наиболее многочисленными являются исследования в лесных и болотных экосистемах, на долю которых приходится  $\frac{3}{4}$  всех площадок наблюдений. В других типах естественных экосистем (тундра, лесостепь, степь) измерения проводятся только на 1 площадке, а на вырубках, в агроценозах, залежных и луговых экосистемах на данный момент функционирует по 2-4 площадки наблюдений.

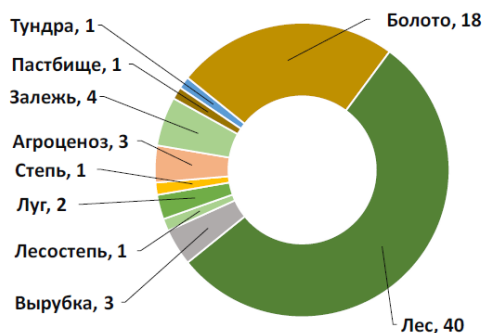


Рис. 2. Распределение площадок наблюдений за эмиссией  $\text{CO}_2$  из почв по разным типам экосистем.

Преобладающая часть измерений эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв проводится в течение вегетационного сезона (апрель-ноябрь), и только на 13 площадках наблюдений (ИФХиБПП РАН, ИБ Коми НЦ УрО РАН, ИЛ КарНЦ РАН) измерения эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв проводятся круглогодично.

Таким образом, в рамках ВИП ГЗ необходима организация наблюдений в полупустынной, степной и тундровой зонах, в агроценозах и на пастбищах. Также необходимо увеличение периода длительности наблюдений до преимущественно круглогодичных и многолетних (5 и более лет) с целью получения более достоверных экспериментальных оценок годовых потоков  $\text{CO}_2$  из почв.

Другим немаловажным моментом при организации национальной сети наблюдений за эмиссией  $\text{CO}_2$  из почв является унификация методических подходов, расчетных алгоритмов и проведение специальных методологических исследований по сравнению данных, полученных на разном оборудовании.

В рамках единой сети наблюдений за эмиссией  $\text{CO}_2$  из почв на территории РФ, создаваемой в рамках реализации ВИП ГЗ, впервые будет проведено обобщение данных *текущих* измерений эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв в репрезентативных экосистемах основных биоклиматических регионов России и будет дана количественная оценка связи эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв с метеорологическими и гидротермическими параметрами в актуальном режиме.

#### 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).

**АВТОРСКИЙ АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ**

Абакумов Евгений Васильевич  
e\_abakumov@mail.ru

Абросимов Константин Николаевич  
kv2@bk.ru

Адриан Ирина Александровна  
i\_yakshina@rambler.ru

Алексеев Алексей Алексеевич  
chev.soil@list.ru

Алексеев Иван Ильич  
alekseevivan95@gmail.com

Ананко Татьяна Викторовна  
dkonyushkov@yandex.ru

Андроханов Владимир Алексеевич  
androhanov@issa-siberia.ru

Бадмаев Нимажап Баяржапович  
nima\_b@mail.ru

Бобрик Анна Александровна  
ann-bobrik@yandex.ru

Боескоров Василий Степанович  
danpp@mail.ru

Бугров Максим Павлович  
merkssotr@gmail.com

Бунина Оксана Александровна  
obunina@proektirovanie.gazprom.ru

Ван Вэньцзюань  
st082527@student.spbu.ru

Васильева Галина Кирилловна  
gkvasilyeva@rambler.ru

Васильчук Джессика Юрьевна  
jessica.vasilchuk@gmail.com

Васина Анастасия Игоревна  
aivasina97@mail.ru

Ватутин Георгий Дмитриевич  
georgyvaturin@yandex.ru

Воронин Александр Яковлевич  
dkonyushkov@yandex.ru

Гвоздева Виктория Олеговна  
gvozdeva.victory@yandex.ru

Герасимова Мария Иннокентиевна  
maria.i.gerasimova@gmail.com

Гинзбург Александр Павлович  
alexandrginzburg13154@yandex.ru

Гололобова Анна Григорьевна  
nuta0687@mail.ru

Голубятников Леонид Леонидович  
golub@ifaran.ru

Гончарова Ольга Юрьевна  
goncholgaj@gmail.com

Гончиков Бато-Мунко Николаевич  
batomunk74@mail.ru

Горбач Николай Михайлович  
nikolay.tbo@yandex.ru

Горячкин Сергей Викторович  
sergey.gory@gmail.com

Губин Станислав Викторович  
gubin.stas@mail.ru

Гусева Анна Сергеевна  
annapochva@mail.ru

Давыдов Сергей Петрович  
davydoffs@mail.ru

Давыдова Полина Денисовна  
1032193247@rudn.ru

Данилов Петр Петрович  
danpp@mail.ru

Данько Михаил Михайлович  
mdanko1996@mail.ru

Дворников Юрий Александрович  
ydvornikow@gmail.com

Денева Светлана Валентиновна  
deneva.18.08.1962@yandex.ru

Десяткин Роман Васильевич  
rvdes@ibpc.ysn.ru

Дитц Алла Анатольевна  
kolesnikova@ib.komisc.ru

Долгих Андрей Владимирович  
an.dolgikh@gmail.com

Евграфова Светлана Юрьевна  
esj@yandex.ru

Егоров Христофор Викторович  
x.egorov@inbox.ru

Ермолаева Светлана Валерьевна  
sveta\_efa@mail.ru

Елсукова Екатерина Юрьевна  
elsukovaeu@mail.ru

Ершова Марина Ивановна  
marina\_ershova\_01@mail.ru

Жангуров Егор Васильевич  
zhan.e@mail.ru

Жирков Александр Федотович  
zhirkov\_af@mail.ru

Завалишин Николай Николаевич  
nickolos@ifaran.ru

Задорожная Наталия Александровна  
z.natalia.95@gmail.com

Замолодчиков Дмитрий Геннадьевич  
dzamolod@mail.ru

Занина Оксана Геннадьевна  
oksanochka\_zet@mail.ru

Заров Евгений Андреевич  
zarov.evgen@yandex.ru

Землянскова Анастасия Александровна  
anastasiazemlanskova@gmail.com

Иванов Александр Викторович  
aleksandrvg86@mail.ru

Ивашченко Кристина Викторовна  
ivashchenko.kv@gmail.com

Истигечев Георгий Игоревич  
istigechev.g@yandex.ru

Каверин Дмитрий Александрович  
dkav@mail.ru

Китаев Лев Михайлович  
lkitaev@mail.ru

Клюка Глеб Геннадьевич  
gleb.klyuka@gmail.com

Ковалева Екатерина Игоревна  
katekov@mail.ru

Ковалёва Нуне Арсеновна  
bagiryannana@mail.ru

Колмаков Александр Андреевич  
chunkfgfg@yandex.ru

Конакова Татьяна Николаевна  
konakova@ib.komisc.ru

Конопляникова Юлия Викторовна  
jkonopl@gmail.com

Конюшков Дмитрий Евгеньевич  
dkonyushkov@yandex.ru

Королёв Михаил Алексеевич  
mihailkorolev1997@gmail.com

Королева Екатерина Сергеевна  
koroleva\_katy@inbox.ru

Кривобоков Леонид Владиленович  
leo\_kr@mail.ru

Кузьмина Дарья Михайловна  
kuzmina.d.m.95@gmail.com

Кулаков Артем Павлович  
cryolithozone@mail.ru

Кулик Артем Александрович  
k.artem.a@yandex.ru

Курганова Ирина Николаевна  
ikurg@mail.ru

Кушнов Иван Денисович  
st084838@student.spbu.ru

Лаптева Елена Морисовна  
elena.lapteva.60@mail.ru

Ларина Арина Владиславовна  
larin.arina2003@gmail.com

Лебедева Людмила Сергеевна  
lyudmilaslebedeva@gmail.com

Лесовая Софья Николаевна  
sofia.lessovaia@mail.ru

Лиханова Ирина Александровна  
likhanova@ib.komisc.ru

Лойко Сергей Васильевич  
s.loyko@yandex.ru

Лупачев Алексей Владимирович  
a.lupachev@gmail.com

Лю-Лян-Мин Екатерина Ивановна  
gruzdeva.katua94@yandex.ru

Мангатаев Александр Цыренович  
aleksandr\_man@mail.ru

Масягина Оксана Викторовна  
oxanamas@mail.ru

Матвиенко Анастасия Игоревна  
matvienko.ai@ksc.krasn.ru

Матышак Георгий Валерьевич  
matyshak@gmail.com

Мачулин Дмитрий Львович  
dmachulin@yandex.ru

Мергелов Никита Сергеевич  
nikita.mergelov@gmail.com

Миронова Марина Александровна  
mma.ecology@gmail.com

Моргун Евгения Николаевна  
morgun148@gmail.com

Московченко Дмитрий Валерьевич  
moskovchenko1965@gmail.com

Мухортова Людмила Владимировна  
l.mukhortova@gmail.com

Низамутдинов Тимур Ильгизович  
timur\_nizam@mail.ru

Никитин Дмитрий Алексеевич  
dimnik90@mail.ru

Пастухов Александр Валериевич  
alpast@mail.ru

Первушина Арина Николаевна  
a.n.pervushina@utmn.ru

Петров Алексей Анатольевич  
petrov\_alexey@mail.ru

Петров Дмитрий Григорьевич  
pd437807@mail.ru

Печкин Александр Сергеевич  
a.pechkin.ncia@yandex.ru

Поляков Вячеслав Игоревич  
slavon6985@gmail.com

Пономарёва Татьяна Валерьевна  
bashkova\_t@mail.ru

Попов Сергей Викторович  
spopov67@yandex.ru

Прокушкин Анатолий Станиславович  
prokushkin@ksc.krasn.ru

Раудина Татьяна Валериевна  
tanya\_raud@mail.ru

Розанова Марина Сергеевна  
rozanova\_ms@mail.ru

Рязанцева Мария Игоревна  
ryazmasha@yandex.ru

Седов Сергей Николаевич  
serg\_sedov@yahoo.com

Семина Ольга Юрьевна  
sem\_olga02@mail.ru

Сидорова Татьяна Александровна  
tatasidorof@yandex.ru

Соболев Николай Сергеевич  
kolyhome2000@yandex.ru

Соромотин Андрей Владимирович  
asoromotin@mail.ru

Сулейманов Азамат Русланович  
filpip@yandex.ru

Сулкарнаев Фарид Рамильевич  
f.r.sulkarnaev@utmn.ru

Сыроежко Михаил Юрьевич  
syroezhko.michail@gmail.com

Таскаева Анастасия Анатольевна  
taskaeva@ib.komisc.ru

Темботов Рустам Хасанбиевич  
tembotov.rustam@mail.ru

Тимофеева Мария Валерьевна  
mtimofeeva02@gmail.com

Толстыгин Кирилл Дмитриевич  
smartman217@gmail.com

Трифоновна Виктория Александровна  
victoriatrifonova04@gmail.com

Устинов Никита Борисович  
nikustinov@yandex.ru

Фёдоров-Давыдов Дмитрий Германович  
muss-96@yandex.ru



Федорова Карина Тимуровна  
galgriosa@yandex.ru

Филимоненко Екатерина Анатольевна  
eafilimonenko@mail.ru

Фролова Любовь Сергеевна  
l.frolova2000@gmail.com

Хирк Анастасия Вячеславовна  
nast0896@mail.ru

Хлопцова Дарья Дмитриевна  
dasha.khloptsova@gmail.com

Ходжаева Анна Каримовна  
akho2@rambler.ru

Хохлова Ольга Сергеевна  
olga\_004@rambler.ru

Чебыкина Екатерина Юрьевна  
doublemax@yandex.ru

Чевычелов Александр Павлович  
chev.soil@list.ru

Чепурнова Мария Александровна  
liromi@inbox.ru

Чуванов Станислав Витальевич  
stas.chuvanov@gmail.com

Чулей Артемий Дмитриевич  
artem957148@yandex.ru

Шамрикова Елена Вячеславовна  
shamrikovaelena@yandex.ru

Шатилович Анастасия Валерьевна  
nastyasha@rambler.ru

Шейн Александр Николаевич  
a.n.shein@yandex.ru

Шейнкман Владимир Семенович  
vlad.sheinkman@mail.ru

Шишконокова Екатерина Анатольевна  
3005k@mail.ru

Шмакова Кристина Алексеевна  
kshmakova@rgau-msha.ru

Шматова Анастасия Геннадьевна  
a.shmatova@yandex.ru

Якимов Никита Дмитриевич  
nyakimov96@mail.ru

Яковлева Софья Алексеевна  
tutushka184@bk.ru

Якубенко Станислав Викторович  
staslp750@gmail.com

Gu Xiuyuan  
gxy641948749@126.com

Xiaowen Ji  
jixiaowen4321@qq.com  
40

Научное электронное издание

МЕРЗЛОТНЫЕ ПОЧВЫ В АНТРОПОЦЕНЕ

Тезисы докладов

Всероссийская научно-практическая конференция  
20-26 августа 2023, Салехард – Лабытнанги, ЯНАО, Россия

Оригинал-макет и корректура: О.Н. Абрамовских, Н.Н. Леоненко

DOI: 10.5281/zenodo.8199526

Компьютерный набор. Усл. печ. л. 18.98. Заказ 08(23)