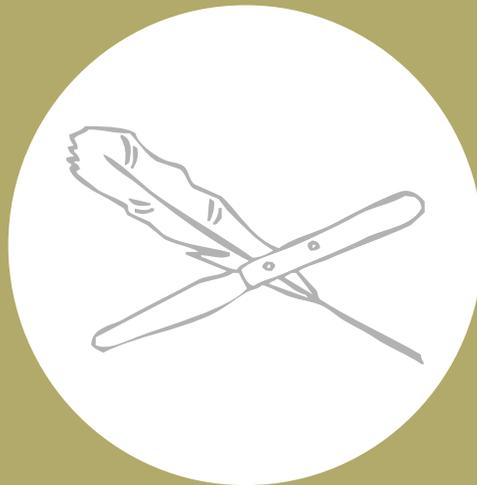


ГРУНТОВЕДЕНИЕ

№ 2(19)
2022





ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

ООО НПП «ГЕОТЕК» – ВЕДУЩИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ, МЕРЗЛЫХ, КРУПНООБЛОМОЧНЫХ И СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ.



АДАПТИРУЕМОСТЬ
ОБОРУДОВАНИЯ



ВЫГОДНАЯ
ЦЕНА



НАДЕЖНЫЙ
СЕРВИС



ЭКОНОМИЯ
БЮДЖЕТА

КОМПЛЕКС АСИС ПРО ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ МЕТОДОМ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

Для исследований прочностных, деформационных и реологических характеристик: пределов кратковременной и длительной прочности при трехосном сжатии; модулей упругости, деформации; модуля сдвига; коэффициентов Пуассона и поперечных деформаций.



не требует
размещения в
холодильной
камере



- испытания в соответствии с ГОСТ, ASTM;
- выполнение изотропной и анизотропной консолидации;
- выполнение статического и кинематического режимов вертикального силового воздействия, с контролем напряжений и деформаций;
- реализация различных траекторий напряжений;
- измерение продольных и поперечных деформаций образца на локальной базе;
- автоматизированный режим испытания;
- высокая точность управления локальной температурой;
- модульный принцип конструкции.

440004, Россия, г. Пенза, ул. Центральная, строение 1М,

☎ +7(8412) 999-189, 8-800-200-16-05 (звонок по России бесплатный),

✉ sales@npp-geotek.ru, npp-geotek.com

*На правах рекламы

Охотинское общество грунтоведов

ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Gruntovedenie

№ 2(19)
2022

Журнал основан в 2012 г.

Главный редактор

Е. А. Вознесенский

Редакционная коллегия:

Е. А. Вознесенский, А. А. Лаврусевич, В. А. Королев, Б. Ф. Апарин, Г. Г. Болдырев,
Л. П. Норова, А. В. Русаков, А. А. Свертилов, Л. К. Семенова, Л. А. Строкова,
Н. С. Никифорова, А. И. Попов, Г. П. Постоев, С. В. Сольский

Зав. редакцией Ю. Ю. Соколова

Адрес редакции: 199034, Санкт-Петербург, 7-ая линия ВО, д. 2/1

тел.: +7 921 986 51 06

www.okhotin-grunt.ru

E-mail: gruntovedenie@mail.ru

okhotin-grunt@mail.ru

Санкт-Петербург

СОДЕРЖАНИЕ

К 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ В. Д. ЛОМТАДЗЕ

Л. П. Норова¹, Т. Н. Николаева²

**ФОРМИРОВАНИЕ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ
В ТРУДАХ ВАЛЕРИЯ ДАВИДОВИЧА ЛОМТАДЗЕ**

3

ГЕНЕТИЧЕСКОЕ ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Г. Г. Ахманов¹, Г. В. Соломин¹, Е. В. Петрова¹, Е. А. Сенцова¹, М. С. Никитин¹,

Д. В. Корост¹, Е. А. Вознесенский^{1,2}

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПЕРЕУПЛОТНЕНИЕ
ГЛИНИСТЫХ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ
ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ**

13

ГРУНТОВЕДЕНИЕ — ОСОБОЕ МНЕНИЕ

И. Ю. Григорьева¹, А. В. Морозов², М. А. Гладченко³

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ
КВАРЦЕВОГО ПЕСКА ПРИ ВНЕСЕНИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, И ИХ ВЛИЯНИЕ НА
РЕЗУЛЬТАТЫ ФИТОТЕСТИРОВАНИЯ**

27

ПОЧВОВЕДЕНИЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

К. А. Бахматова¹, А. А. Шешукова², Е. Г. Панова³, С. А. Егорова⁴

**ЛИТОРИНОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ КАК ПРИРОДНЫЙ СУБСТРАТ ГОРОДСКИХ
ПОЧВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА**

40

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

С. Г. Миронюк¹, В. Ю. Ионов²

**ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗЖИЖАЕМОСТИ ГРУНТОВ ЮЖНОЙ ЧАСТИ
БАРЕНЦЕВА МОРЯ**

51

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДИНАМИКА

Г. П. Постоев¹, А. И. Казеев², М. М. Кучуков³

**ПОВЕДЕНИЕ ГРУНТОВ И ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР
ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ОПОЛЗНЕВОГО БЛОКА**

58

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

Е. В. Городнова¹, Н. Г. Корвет², Е. А. Суворова³

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСНОВАНИЯ УЧАСТКА
СКОРОСТНОЙ АВТОДОРОГИ МОСКВА — САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО УСИЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУРОВЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

65

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-2-19-3-12>
УДК 624.131.1 (092)

ФОРМИРОВАНИЕ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ В ТРУДАХ ВАЛЕРИЯ ДАВИДОВИЧА ЛОМТАДЗЕ

FORMATION OF SCIENTIFIC DIRECTIONS OF ENGINEERING GEOLOGY IN THE WORKS OF VALERY DAVIDOVICH LOMTADZE

© 2022 г. Л. П. Норова¹, Т. Н. Николаева²

© 2022 L. P. Norova¹, T. N. Nikolaeva²

^{1,2} Санкт-Петербургский горный университет, 22-я линия, д. 2, Санкт-Петербург, 199106, Россия

^{1,2} Saint-Petersburg Mining University, 22-nd, bld. 2, Saint-Petersburg, 199106, Russia

Norova_LP@pers.spmi.ru¹, Nikolaeva_TN@pers.spmi.ru²

«Слетают листки отрывных календарей, и мы даже не замечаем, как стремительно пролетают наши дни.... А если бы существовал календарь, отсчитывающий года, мы также бы, наверное, не ощущали, как ускользает из-под ног время. И в один прекрасный день обнаружим, что смотрим на жизнь уже с вершины шестидесяти, семидесяти или восьмидесяти лет.....».

И. Гагарина. Горняцкая правда. 13 ноября 1992 г.

Две знаменательные даты — 100 и 110 лет со дня рождения Валерия Давидовича Ломтадзе (1912–1993), доктора геолого-минералогических наук, заслуженного деятеля науки РФ, основоположника Ленинградской (Санкт-Петербургской) школы инженерной геологии с интервалом в 10 лет были отмечены геологической общественностью и кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета. В преддверии 100-летнего юбилея, в 2012 году, был издан сборник статей и воспоминаний, посвященный жизни, научной и педагогической деятельности В. Д. Ломтадзе, а также развитию его творческого наследия в инженерной геологии на современном этапе [1]. Одним из инициаторов публикации этого издания была вдова Валерия Давидовича — Антонина Михайловна Ломтадзе. Кроме того, огромная заслуга в появлении этого сборника принадлежит выдающемуся ученому и замечательному педагогу — доктору геолого-минералогических наук, профессору Владимиру Андреевичу Кирюхину (1930–2011). Он, как вдохновитель и научный редактор статей, глубоко переживал за судьбу сборника, посвященного одному из его учителей. В последние месяцы своей жизни Владимир Андреевич написал вступительное слово к будущему изданию, хотя оно еще не приобрело окончательный вид. Большую помощь и поддержку в создании книги оказали друзья и коллеги, кто лично был

знаком с В. Д. Ломтадзе и интересуется историей инженерной геологии.

После издания сборника прошло 10 лет. 3 сентября 2022 года исполнилось бы 110 лет со дня рождения Валерия Давидовича. Авторы данной статьи, его ученики и коллеги, на основе собранных новых архивных материалов попытались описать основные временные этапы становления Ученого и Педагога и формирования научных направлений в инженерной геологии.

Семья

В своей автобиографии Валерий Давидович скромно написал: «Родился в 1912 году в г. Иркутске». Отец — Давид Иорданович Ломтадзе (1885 г. р.) был кадровым военным, служил в царской армии, погиб на германском фронте в Первую мировую войну (рис. 1); мама — Надежда Николаевна Ломтадзе (1892 г. р.), коренная иркутянка, в 23 года стала вдовой и посвятила свою жизнь двум сыновьям — Валерию 1912 г. р. и Евгению 1914 г. р. В период с 1916 по 1936 г. она работала в Управлении Восточно-Сибирской железной дороги машинисткой, секретарем, а потом счетоводом.

Антонина Михайловна в своих воспоминаниях [3] отмечала, что, хотя все годы Первой мировой войны и последующие 1920–1930-е гг. были трудными, Надежда Николаевна воспитала в детях тягу к знаниям, занятиям спортом и труду.



Рис. 1. Давид Иорданович (перед отъездом на фронт),
Надежда Николаевна, Валерий и Евгений
Фото 1915 г. Из архива А. М. Ломтадзе

В биографической справке Валерия Давидовича отмечено, что уже после окончания средней школы в г. Иркутске он начал работать в качестве лаборанта на кафедре физики Педрабфака (1930–1931).

Университетские годы и начальный этап профессионального становления

В газете «Горняцкая правда» от 13 ноября 1992 года Валерий Давидович так охарактеризовал этот период своей биографии журналистке И. Гагариной: «Именно судьба, а не мечта привела меня после окончания школы в Восточно-Сибирское геологическое управление, где работали в то время такие корифеи геологии как Смирнов, Тетяев, Жемчужников, Толстихин. Повезло и на руководителя: Петр Яковлевич Антропов, в будущем министр геологии, обязал группу молодых людей, в числе которых был и я, продолжить учебу в университете. Из этих ребят была сформирована спецгруппа, которая первую половину дня училась, а вторую и до позднего вечера работала в Управлении. Позже отчеты о работе стали дипломными проектами».

В сентябре 1931 г. Валерий Давидович поступил в Восточно-Сибирский Государственный Университет им. А. А. Жданова на геологическое отделение. Уже в Университете, с 1932 года, Валерий Давидович

работал в геологических партиях Восточно-Сибирского геологического управления сначала старшим коллектором Тарбагатайской геологической (1932–1934) и Хилокской угольной поисково-разведочной партии в Забайкалье (1934–1935), позже прорабом Иннокентьевской-Иркутской инженерно-геологической партии (1935–1937).

В предвоенные годы, закончив в 1936 г. Университет по специальности «Геология», В. Д. Ломтадзе выполнял обязанности гидрогеолога партии Восточно-Сибирского геологического управления (1937), начальника Забайкальской партии № 9 (1937–1938), ответственного руководителя по отрасли «Гидрогеология» Восточно-Сибирского геологического управления (1938), начальника Кукинской гидрогеологической партии и технического руководителя Улан-Уденской партии (1938–1939), начальника геологической партии экспедиции № 12 Мостранспроекта НКПС, главного геолога Иркутской экспедиции Мостранспроекта [2].

Интересно отметить, что по материалам инженерно-геологических исследований в 1938 г. вышла в свет первая публикация молодого ученого «Геологические экскурсии в окрестностях Иркутска» [4], заслужившая лестный отзыв профессора С. Я. Яковлева. Отзыв был опубликован в журнале «Наука и Знание» (изд. Ак. Наук СССР, 1941).

В 1939 г. Валерий Давидович начал работы на Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД), проходившей по бассейну Байкала (участок железной дороги Улан-Удэ — Наушки, обходная железная дорога через горы от Иркутска до ст. Слюдянка). Позже, работая в должности главного геолога Иркутской экспедиции Мостранспроекта, он вместе с коллегами и своей будущей женой, Антониной Михайловной (рис. 2), был направлен на Кругобайкальский участок Транссибирской магистрали — судьбоносный объект многих молодых талантливых геологов, в том числе В. Д. Ломтадзе. Сложные инженерно-геологические условия создавали огромные трудности для эксплуатации этого участка, за всеми сооружениями необходимы были постоянные наблюдения с инженерно-геологической документацией. В военных условиях инженеры-геологи несли ответственность за состояние дороги. Они выполняли колоссальную работу — детальную инженерно-геологическую съемку масштаба 1:2 000 всего скально-обвального участка. Съемка включала маркировку неустойчивых, угрожающих обвалами блоков и глыб горных пород, а также участков сильнотрещиноватых и выветрелых горных пород. Составлялись поперечные профили сложных и опасных участков, делались зарисовки (рис. 3) и давались рекомендации. Антонина Михайловна в своих вос-



Рис. 2. Антонина Михайловна Ломтадзе (1960-е гг., из архива А. М. Ломтадзе)

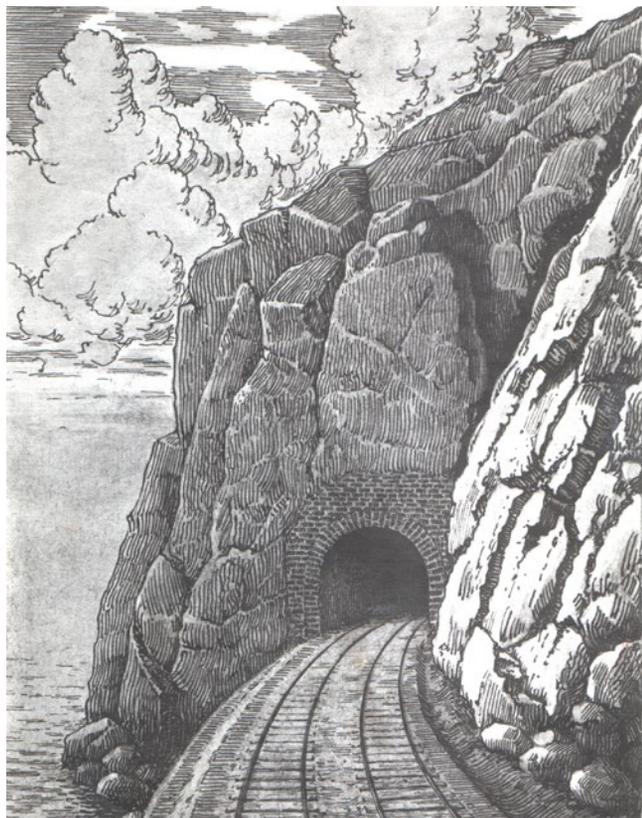
поминаниях писала, что «все эти работы, а главное постоянный текущий надзор за обвальными участками, обеспечили в период Отечественной войны бесперебойное следование поездов по Кругобайкальской железной дороге» [3].

Несмотря на огромную нагрузку, В. Д. Ломтадзе подготовил и защитил кандидатскую диссертацию

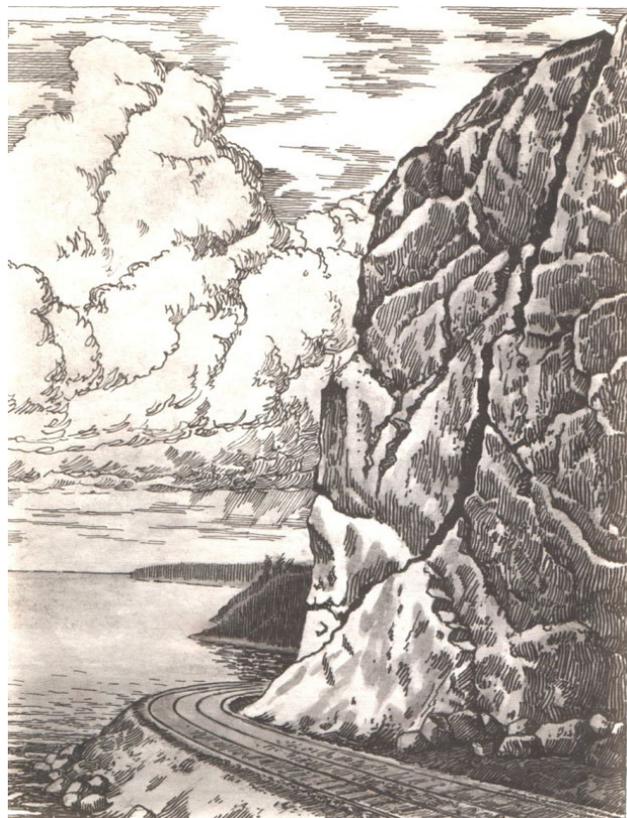
на очень актуальную тему «Обвальные явления в Юго-Западном Прибайкалье», что является итогом этого периода. В молодом ученом проявились такие качества как колоссальная энергия, трудоспособность, эрудиция и настойчивость. Кругобайкальский участок железной дороги, где тесно переплетались решения практических и теоретических вопросов, оказал существенное влияние на формирование инженерной геологии Сибири.

На начальном этапе своей профессиональной деятельности Валерий Давидович занимался также и гидрогеологическими исследованиями в Забайкалье. Так, например, в 1938 г. им проводились работы по каптажу Кукинского минерального источника (табл. 1). В результате этих работ выяснены условия происхождения минеральных вод, расширены гидроминеральные ресурсы курорта Кука. В 1944–1945 гг. он принимал участие в разработке проблемы осушения Черемховского месторождения угля с помощью вертикального дренажа.

Параллельно с основной работой с 1940 по 1942 г. Валерий Давидович читал курсы инженерной геологии и гидрогеологии в Иркутском государственном университете. С этих лет началась его педагогическая деятельность.



а)



б)

Рис. 3. а) — туннель, сооруженный в скале, отделенной от массива сбросовой трещиной, б) -сбросовая трещина в гранито-нейсах, отчлняющая часть нагорного откоса (рисунки В. Д. Ломтадзе)

Таблица 1. Список работ Валерия Давидовича Ломтадзе на начальном этапе профессионального становления

№ п/п	Наименование работы	Печатная или рукописная	Название издательства	Год издания
1	Отчет о работах Дарасунской инженерно-геологической партии	Рукопись	Фонды ВСГУ	1936
2	Отчет о работах Забайкальской инженерно-геологической партии	Рукопись	Фонды ВСГУ	1937
3	Отчет о работах комплексной инженерно-геологической партии № 9	Рукопись	Фонды ВСГУ	1938
4	Отчет о работах Кукинской гидрогеологической партии	Рукопись	Фонды ВСГУ	1938
5	Отчет о работах Улан-Удэнской инженерно-геологической партии	Рукопись	Фонды ВСГУ	1939
6	Отчет об инженерно-геологических исследованиях по трассе линии ж.д. № 12	Рукопись	Фонды Союзтранспроекта	1941
7	Инженерно-геологические условия обвального участка линии ж.д. № 12 от ст. И. до ст. К	Рукопись	Фонды Союзтранспроекта	1944
8	Сводный отчет о гидрогеологических условиях Черемховского месторождения Иркутского угленосного бассейна	Рукопись	Фонды ЛГИ	1945

Становление Валерия Давидовича Ломтадзе как педагога и ученого в стенах Ленинградского горного института (1943–1973 гг.).

Во время эвакуации Ленинградского горного института в Черемхово Иркутской области (1943–1944 гг.) Валерий Давидович Ломтадзе по совместительству был оформлен ассистентом кафедры гидрогеологии и инженерной геологии, а с 1944 г. по конкурсу зачислен в штат ЛГИ. После реэвакуации горного института, в 1945 г., он активно занимается ремонтом помещений кафедры, с огромным энтузиазмом выполняет разнообразную работу, в первую очередь — по восстановлению лаборатории физико-механических свойств горных пород, оснащению ее оборудованием и приборами. Помогала ему в воссоздании лаборатории старший лаборант кафедры Елена Лаврентьевна Заседателява.

С 1947 по 1960 г. Валерий Давидович — доцент кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Ленинградского горного института. Здесь он читал лекции по всем разделам инженерной геологии, проводил лабораторные занятия, вел курсовое и дипломное проектирование, и выполняемая им на кафедре педагогическая работа высоко оценивалась. Уже в этот период он получил награды: медаль «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» (1948); медаль «За трудовую доблесть», персональное звание Горного инженера I ранга (1948); медаль «В память 250-летия Ленинграда» (1957).

Накопленный большой практический опыт в довоенные и военные годы позволил Валерию Давидовичу параллельно с педагогической дея-

тельностью активно участвовать в проведении производственных и научно-исследовательских работ.

Участие в инженерных изысканиях Ленинградского отделения Всесоюзного института «Гидропроект». Тесно сотрудничая со специалистами института «Гидропроект», В. Д. Ломтадзе принимал непосредственное участие в проведении инженерно-геологических изысканий, консультировал, давал заключения об инженерно-геологических условиях проектируемых объектов [3,27]. В его списке трудов заметное место в этот период занимали отчеты об инженерно-геологических изысканиях под гидротехническое строительство на р. Саксагани, р. Каме (Камская ГЭС), Соликамском гидроузле, Воткинской ГЭС и др. (табл.2). Ряд выпускников кафедры, работавших на инженерно-геологических изысканиях для гидротехнического строительства под руководством В. Д. Ломтадзе, защитили диссертации (А. А. Каган, И. А. Пирогов, М. П. Леонов, Ф. П. Стрельский и др.). В монографии «История Ленгидропроекта 1917–2007» (СПб: Гуманистика, 2007) отмечены заслуги Валерия Давидовича в изучении инженерно-геологических и гидрогеологических особенностей участков строительства гидроузлов.

Изучение комплексов глинистых пород протерозоя, палеозоя и кайнозоя Восточно-Европейской платформы различной степени литификации. Огромный интерес В. Д. Ломтадзе проявил к изучению свойств глинистых пород рассматриваемой

Таблица 2. Список работ, выполненных на гидротехнических объектах при активном участии В. Д. Ломтадзе

№ п/п	Наименование работы	Печатная или рукописная	Название издательства	Год выпуска
1	Отчет об инженерно-геологической съемке по долине р. Саксагань	Рукопись	Фонды Ленгидэпа (коллективная работа)	1945
2	Инженерно-геологические условия строительства бетонной плотины Камской ГЭС на р. Каме	Рукопись	Фонды Ленгидэпа (коллективная работа)	1947
3	Инженерно-геологические условия строительства бетонной плотины Ондской ГЭС	Рукопись	Фонды Ленгидэпа (коллективная работа)	1949
4	Отчет о камеральной обработке материалов по Соликамской ГЭС на р. Каме	Рукопись	Фонды Ленгидэпа (коллективная работа)	1950
5	О возможном влиянии проектируемого Дзержинского водохранилища на р. Саксагань на изменение гидрогеологических условий шахт Криворожья	Печатная	Записки ЛГИ т. XXIV	1950
6	К вопросу о выборе створа для Воткинской ГЭС на р. Каме	Рукопись	Фонды Ленгидэпа (коллективная работа)	1951
7	Инженерно-геологические условия строительства гидроэлектростанции на р. Неве	Рукопись	Фонды Ленгидэпа (коллективная работа)	1952

территории: глины венда и нижнего кембрия; песчано-глинистых и карбонатно-глинистых отложений верхней перми; пестроцветных песчано-глинистых отложений верхнего девона; глины угленосной свиты нижнего карбона; озерно-ледниковых глины четвертичного возраста и др. Были выполнены детальные исследования этих пород из разных районов. Первые научные статьи, посвященные сравнительной характеристике и оценке свойств глинистых пород палеозоя и кайнозоя Восточно-Европейской платформы, были опубликованы в 1952–1965 гг. [17, 19, 20, 22, 23, 24, 25].

Обобщение большого фактического материала по изучению инженерно-геологических условий строительства отдельных сооружений в г. Ленинграде. Обладая организаторскими способностями, В. Д. Ломтадзе вместе с коллективом кафедры создал экспериментальную базу — одну из первых инженерно-геологических лабораторий нашей страны, где выполнялись исследования глинистых пород для различных проектных и производственных организаций (трест ГРИИ, Ленметропроект, Северо-Западное геологическое управление). Применявшиеся при этом методы лабораторных исследований физико-механических свойств глинистых пород были опубликованы Валерием Давидовичем уже в 1952 г. [16].

Более 25 лет В. Д. Ломтадзе руководил исследованиями физико-механических свойств дочетвертичных глины вендской системы для обоснования проектов сооружений Ленинградского метрополитена, оказывая большую помощь специали-

стам в решении многих инженерно-геологических вопросов строительства различных объектов метро [23, 26].

Занимаясь вопросами формирования инженерно-геологических условий строительства различных сооружений, Валерий Давидович смог накопить теоретические материалы и экспериментальные данные по формированию физико-механических свойств глинистых пород при литификации, которые были положены в основу его докторской диссертации на тему «Формирование физико-механических свойств глинистых пород при литификации», защищенной в 1959 г. В 1960 г. ему была присуждена ученая степень доктора геолого-минералогических наук, присвоено ученое звание и должность профессора кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Ленинградского горного института (рис. 4).

На основе многолетних исследований и анализа работ Н. М. Страхова, П. А. Ребиндера, В. А. Приклонского и др. В. Д. Ломтадзе обосновал и построил инженерно-геологическую классификацию глинистых пород по степени их литификации; уточнил и дополнил известную классификацию горных пород Ф. П. Саваренского, вводя в нее новые разновидности пород и количественные показатели их физико-механических свойств.

Было сформировано научное направление, получившее аналогичное название с основным разделом инженерной геологии — инженерная петрология. Валерий Давидович предложил это название вместо общеизвестного грунтоведения, существенно изменив его содержание [9, 10].



Рис. 4. Валерий Давидович Ломтадзе (1960-е годы, из архива А. М. Ломтадзе)

Разработка принципов региональных инженерно-геологических исследований, в том числе инженерно-геологических проблем градостроительства. Значительное место в научной деятельности В. Д. Ломтадзе, его сотрудников и аспирантов, среди которых следует назвать О. В. Боровика, М. С. Захарова, В. Н. Крылова, А. В. Кузьмина, В. И. Игнатовичуса, Р.-Б. А. Микшиса и др., в этот период занимали региональные инженерно-геологические исследования территории Северо-Запада Русской платформы, в том числе, Ленинградской области, городов Ленинграда, Вильнюса, Архангельска, а также разработка принципов инженерно-геологического районирования и картирования. Постоянное сотрудничество с геологическими, исследовательскими организациями, вузами Ленинграда позволило Валерию Давидовичу уже в 1960 году выступить с докладом «Инженерно-геологическое районирование территории Ленинградского экономического административного района», в котором территории Ленинграда была дана общая инженерно-геологическая характеристика и оценка по условиям строительства сооружений, сформулированы основные задачи, решение которых способствовало бы рациональному размещению строительных пло-

щадок и экономически более выгодному ведению строительных работ [13]. Кроме того, начиналась работа по составлению Генерального плана города в новых расширенных границах. В работе по геологическому обоснованию Генерального плана строительства Ленинграда 1967 года непосредственно участвовал В. Д. Ломтадзе. Он, совместно с С. Р. Шевченко и другими геологами СЗТГУ, является соавтором сводного отчета Северо-Западного геологического управления «Геология, гидрогеология и инженерная геология Ленинграда» (фонды СЗТГУ, 1967). В этом отчете были обобщены все материалы по геологии, гидрогеологии и инженерной геологии территории Ленинграда и его окрестностей (по состоянию на 1 января 1966 г.). Следует отметить, что на этом этапе инженерно-геологическому изучению подверглась только верхняя часть разреза до глубин 10–15 м.

Методическое руководство работами по изучению инженерно-геологических условий городского строительства на новом этапе их изучения. Изменение характера застройки, преобладание зданий повышенной этажности и высотных, использование участков, ранее отнесенных к непригодным для застройки, привело к необходимости интенсивного освоения подземного пространства до глубин 60 м и более, накопления материала по опыту строительства в сложных инженерно-геологических условиях, что позволило по-новому анализировать работу системы «геологическая среда-сооружение». Систематизация разнообразных материалов инженерно-геологических исследований позволила коллективу кафедры инженерной геологии под общим руководством В. Д. Ломтадзе (руководитель НИР — Кузьмин А. В.) разработать принципиальные положения типизации инженерно-геологических условий наземного строительства. В 1968–71 гг. были опубликованы статьи о задачах инженерно-геологического районирования [14, 15].

В 1960–70-е гг. коллективом кафедры организовывались межведомственные совещания по инженерной геологии: Инженерная геология Ленинградского экономического района (1960); Методика исследований физико-механических свойств грунтов (1965); Формирование физико-механических свойств горных пород (1966); Инженерно-геологическое картирование и районирование (1968) и др. Для этого периода важным обстоятельством является окончательное становление инженерной геологии, как науки об охране геологической среды. О большой роли В. Д. Ломтадзе свидетельствует организованное им Всесоюзное совещание на тему «Проблемы инженерной геологии в связи с раци-

ональным использованием геологической среды», прошедшее в ЛГИ в 1976 г. с его статьей «Закономерности распространения и развития геологических процессов как основа рационального использования геологической среды» [5]. Это способствовало развитию еще одного научного направления в инженерной геологии — инженерной геодинамики.

Валерий Давидович — заведующий кафедрой инженерной геологии, ученый, общественный деятель (1973–1993).

В 1973 г. Валерий Давидович возглавил кафедру инженерной геологии. К этому времени он стал признанным авторитетом в науке. Научные интересы, их многогранность и широта отражены, прежде всего, в работах аспирантов. В тематике диссертационных работ можно отметить значимое научное направление по исследованию закономерностей возникновения, распространения и динамики развития процессов и явлений [21]. По этой тематике Валерий Давидович создал учебник «Инженерная геодинамика» (1977) [7], где рассматриваются условия развития природных геологических процессов в недрах и на земной поверхности, а также возни-

кающих в связи со строительством сооружений. В нем особо подчеркивается, что все инженерно-геологические исследования геологических процессов и явлений должны обязательно завершаться количественной оценкой и прогнозом.

Валерий Давидович Ломтадзе, его аспиранты и стажеры активно занимались проблемами еще одного направления — инженерной геологией месторождений полезных ископаемых [11]. В одноименном учебнике рассмотрен широкий круг геологических вопросов и практических задач, возникающих при освоении месторождений полезных ископаемых: рудных, угольных, горно-химического сырья, строительных материалов и др. [8].

Геологические условия строительства сооружений, организация и формализация геологического пространства для строительных целей, взаимодействие различных сооружений с горными породами и геологической средой в целом, принципы региональной организации и методики инженерных изысканий на всех стадиях проектирования сооружений, использование опыта строительства раскрыты как в научных работах [6], так и в учебнике «Специальная инженерная геология» [12], который был опубликован в 1978 году.

Учебники В. Д. Ломтадзе пользуются спросом в среде как уже сформировавшихся, квалифицированных, так и будущих специалистов инженеров-геологов не только в нашей стране, но и за рубежом, будучи переведенными на другие языки.

Свыше 80 аспирантов и соискателей, в том числе, из Вьетнама, Кубы, Польши, стран Африки успешно защитили кандидатские и докторские диссертации. Многие из них активно развивали и развивают его идеи, занимают ведущее положение в различных производственных, научных организациях и учебных заведениях.

1970–80-е гг. ознаменованы активным участием Валерия Давидовича в международных конгрессах и симпозиумах. В 1974 г. в Бразилии на Втором международном конгрессе по инженерной геологии он выступил с докладом «Общие закономерности развития геологических процессов и их прогноз». В 1976 г. читал лекции по инженерной геологии в Краковской горной академии в Польше и участвовал в работе 25-ой сессии Международного геологического конгресса с докладом «Закономерности развития гравитационных процессов и их прогноз». В Чехословакии на симпозиуме Международной ассоциации инженеров геологов (1977) сделал доклад «Оползни и другие склоновые процессы». В университете Ориенте Народной Республики Куба (1977, 1986) оказывал помощь в подготовке научных и инженерных кадров, в организации учебно-



Рис. 5. На кафедре инженерной геологии ЛГИ (1980-е гг., архив кафедры)



Рис. 6. Портретная галерея в Горном университете



Рис. 7. Портрет Валерия Давидовича Ломтадзе в галерее Горного университета

методической работы, лабораторий, читал лекции по инженерной геологии. В 1978 г. был командирован в Испанию на Третий международный конгресс по инженерной геологии (доклад «Оценка и прогноз инженерно-геологических условий при проектировании и строительстве городов»). Участвовал в работе 27 Международного геологического конгресса с докладом «Инженерно-геологические основы рационального использования геологической среды и ее охраны при разработке месторождений полезных ископаемых». В Чехословакии в Горно-металлургическом институте (г. Острава) выступил с докладом «Проблемы инженерной геологии при разработке месторождений полезных ископаемых» и др.

Прожита плодотворная научная, насыщенная многими воплощенными в жизнь творческими планами. Однако не был закончен последний научный труд, над созданием которого он работал не один десяток лет — «Словарь по инженерной геологии» [18]. Завершить его после смерти Валерия Давидовича активно помогала в Антонина Михайловна. Без ее деятельного участия эта книга могла бы не

выйти в свет. В издании словаря (1999) большую помощь оказал ректор Санкт-Петербургского горного университета профессор В. С. Литвиненко.

К одному из юбилеев Валерия Давидовича в адресе ректората прозвучали следующие слова: «Наряду с выдающимися педагогами геологоразведочного направления: Д. В. Наливкиным, Н. И. Толстихиным, П. М. Татариновым, Ю. А. Жемчужниковым, Е. О. Погребницким, В. И. Серпуховым, М. М. Тетяевым — вы по праву снискали славу продолжателя геологических традиций Санкт-Петербургского горного института. Вы известны в нашей стране и за рубежом как теоретик одной из главных проблем инженерной геологии — формирования состава, состояния и свойств глинистых горных пород. Ваши фундаментальные труды по рациональному использованию и охране геологической среды при проведении инженерных изысканий являются выдающимся вкладом в отечественную и мировую науку и практику».

По достоинству оценив вклад Валерия Давидовича в становлении и развитии инженерной гео-



Рис. 8. На Северном кладбище, 2007 и 2022 гг.

логии, его портрет размещен в портретной галерее Санкт-Петербургского Горного университета вместе с известнейшими учеными, работавшими в этом старейшем высшем техническом учебном заведении нашей страны (рис. 6, 7).

Как крупного Педагога и Ученого, Валерия Давидовича Ломтадзе характеризует поразительная

работоспособность и жизнелюбие, внимательное человеческое отношение к окружающим. В день его рождения на Северном кладбище собираются коллеги, ученики, сотрудники кафедры вместе с выпускниками разных лет и нынешними студентами (рис. 8). Память о нем сохраняется в сердцах нескольких поколений инженеров-геологов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ И УПОМИНАЕМЫХ В СТАТЬЕ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Валерий Давидович Ломтадзе (к 100-летию со дня рождения): Сборник статей и воспоминаний / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2012. 287 с.
2. Ломтадзе А. М. Валерий Давидович Ломтадзе (1912–1993). Иркутск : Изд-во Иркутского государственного технического университета, 1997. 43 с.
3. Ломтадзе А. М. Одной дорогой вместе //Сб. статей и воспоминаний: Валерий Давидович Ломтадзе (к 100-летию со дня рождения) / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2012. С.13–34.
4. Ломтадзе В. Д. Геологические экскурсии в окрестности г. Иркутска: Справочник. Иркутск : Обл-издат. 1938. 71 с.
5. Ломтадзе В. Д. Закономерности распространения и развития геологических процессов как основа рационального использования геологической среды // Материалы Всесоюзной конференции. Л. : Ленинградский горный институт, 1976. С. 4–14.
6. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология и инженерные изыскания // Инженерная геология. 1979. № 5. С. 3–15.
7. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л. : Недра, 1977. 478 с.
8. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых. Л. : Недра, 1986. 272 с.
9. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. 1-е изд. Л. : Недра, 1970. 528 с.
10. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Недра, 1984. 511 с.
11. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых и их типизация // Записки Ленинградского горного института, 1974. Т. 67. Вып. 2. С. 152–161.
12. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология: Учебник для вузов. Л. : Недра, 1978. 496 с.
13. Ломтадзе В. Д. Инженерно-геологическое районирование территории Ленинградского экономического административного района / В. Д. Ломтадзе, З. М. Мокриенко // В кн.: Вопросы инженерной геологии Ленинградского экономического района. Л. : Изд-во Бюро науч.-техн. информ., 1960. С. 5–15.
14. Ломтадзе В. Д. Методика составления инженерно-геологических карт и задачи инженерно-геологического районирования // Зап. Ленинград. горного института. 1971. Т. 62. Вып. 2. С. 89–99.
15. Ломтадзе В. Д. Методика составления инженерно-геологических карт и задачи инженерно-геологического районирования // Материалы 4-ого регион. совещ. по инженерной геологии. Л., 1968. С. 4–23.
16. Ломтадзе В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов. М. : Гостеолиздат, 1952. 234 с.
17. Ломтадзе В. Д. Особенности свойств глинистых пород в связи с условиями их формирования на примере Северо-Западных районов / Р. Э. Дашко, А. В. Кузьмин // В сб. «Проблемы инженерной геологии» М. : Изд. МГУ, 1970. С. 114–120.
18. Ломтадзе В. Д. Словарь по инженерной геологии. СПб : Санкт-Петербургский горный ин-т, 1999. 360 с.
19. Ломтадзе В. Д. Сравнительная характеристика и оценка инженерно-геологических свойств некоторых типов глинистых пород палеозоя Русской платформы // В кн.: Труды совещ. по инж.-геол. свойствам горных пород и методам их изучения. М., 1956. Т. 1. С. 19–30.
20. Ломтадзе В. Д. Сравнительная характеристика и оценка инженерно-геологических свойств некоторых типов глинистых пород палеозоя Русской платформы // Записки Ленинградского горного института, 1956. Т. 32. Вып. 2. С. 221–223.
21. Ломтадзе В. Д. Теоретические основы инженерной геодинамики // Инженерная геология, 1987. № 1. С. 3–11.

22. Ломтадзе В. Д. Физико-механические свойства глин угленосной свиты нижнего карбона Подмосковского бассейна // Записки Ленинградского горного института, 1952. Т. 26. Вып. 2. С. 43–74.
23. Ломтадзе В. Д. Физико-механические свойства нижнекембрийских глин северо-западной окраины Русской платформы // Записки Ленинградского горного института, 1958. Т. 34. Вып. 2. С. 154–188.
24. Ломтадзе В. Д. Физико-механические свойства глинистых пород верхней пестроцветной свиты верхнего девона Главного девонского поля Русской платформы. // Записки Ленинградского горного ин-та, 1962. Т. 44. Вып. 2. С. 125–151.
25. Ломтадзе В. Д. Физико-механические свойства позднеледниковых ленточных глин окрестностей Ленинграда // Записки Ленинградского горного института, 1965. Т. 48. Вып. 2. С. 108–116.
26. Отчет по теме № 400 «Исследование деформируемости кембрийских глин, вскрытых горными выработками Ленинградского метрополитена». Фонды ЛГИ и Ленметропроекта, 1957.
27. Пирогов И. А. Участие В. Д. Ломтадзе в инженерно-геологических изысканиях для гидротехнического строительства // Сб. статей и воспоминаний: Валерий Давидович Ломтадзе (к 100-летию со дня рождения) / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2012. С. 133–140.

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-2-19-13-26>
УДК 624.131.3

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПЕРЕУПЛОТНЕНИЕ ГЛИНИСТЫХ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

GEOTECHNICAL FEATURES AND OVERCONSOLIDATION OF CLAYEY NEOPLEISTOCENE SEDIMENTS IN THE NORTH-EASTERN BARENTS SEA

© 2022 г. Г. Г. Ахманов¹, Г. В. Соломин¹, Е. В. Петрова¹, Е. А. Сенцова¹,
М. С. Никитин¹, Д. В. Корост¹, Е. А. Вознесенский^{1,2}

© 2022 G. G. Akhmanov¹, G. V. Solomin¹, E. V. Petrova¹, E. A. Sentsova¹,
M. S. Nikitin¹, D. V. Korost¹, E. A. Voznesensky^{1,2}

¹ Геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119234, Москва, Россия
Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, 119234, Moscow, Russia

² Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Уланский пер., д. 13 стр. 2, 101000, Москва, Россия
Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, 13, bld. 2, Ulansky lane, 101000, Moscow, Russia

akhmanov@geol.msu.ru¹

Аннотация. Рассмотрены особенности состава и свойств донных глинистых грунтов, накопившихся в борозде и слагающих холм гляциотектонической пары (анг. «hill-hole pairs»), обнаруженной в северо-восточной части Баренцева моря и опробованной в экспедиции ТТР-19. Грунты характеризуются высокой дисперсностью и полиминеральным составом при высоком суммарном содержании глинистых минералов (36–42%) с преобладанием иллита и смешанослойного образования типа иллит-сметтит с разбухающими межслоями. Для изученных грунтов характерны небольшие вариации показателей физических свойств при общем тренде к сокращению пористости и влажности и увеличению плотности с глубиной. Установлено, что ил суглинистый, переходящий в суглинок, из борозды гляциотектонической пары нормально уплотнен и представляет собой современные морские отложения, а суглинок, отобранный на вершине подводного холма этой структуры, напротив, переуплотнен. Нагрузка предварительного уплотнения составляет 280–290 кПа. Переуплотнение донных грунтов в изученной части Баренцева моря может объясняться их моренной природой. Кроме того, после образования холма его вершина могла подвергнуться частичному размыву с эрозией верхних 14–15 м.

Abstract. Specific composition and properties of sea bottom clayey deposits sampled during the TTR-19 cruise from the high and the depression of glaciotectonic “hill-hole pair” in the north-eastern Barents sea are discussed. The studied soils are highly disperse and polymineral deposits with high clay mineral content (36–52%). Illite and mixed-layer mineral of “illite-smectite” type with swelling interlayers predominate. Soils demonstrate low variations of index properties along studied cores as well as general trend of porosity and water content decrease and density increase with depth. Clayey silt from the depression of «hill-hole pair» appeared to be normally consolidated soil which is typical for recent marine sediments, whereas clayey silt recovered from the top of submarine hill is, on the contrary, overconsolidated. Preconsolidation stress is determined as 280–290 kPa. An overconsolidation in bottom deposits of the studied sector of the Barents Sea corresponds to their subglacial (moraine) origin. Furthermore, after the high was formed, its topmost 14–15 m might have been eroded as data evaluation suggested.

Ключевые слова: переуплотнение, донные отложения, глинистые минералы, Баренцево море, гляциотектонические пары, пористость, плотность, эрозия.

Keywords: overconsolidation, bottom sediments, clay minerals, the Barents Sea, hill-hole pairs, porosity, density, erosion.

Введение

Исследование выполнено на материалах, собранных в морской геолого-геофизической экспедиции TTR-19 в северо-восточную часть Баренцева моря, прошедшей летом 2020 года в рамках Международной программы ЮНЕСКО-МГУ «Training-through-Research» на НИС «Академик Николай Страхов» при поддержке Министерства высшего образования и науки Российской Федерации. Экспедиция проведена с целью поиска зон фокусированной флюидоразгрузки и геохимического картирования углеводородных проявлений, изучения строения верхних горизонтов осадочного чехла, современных геологических процессов и получения новых данных об истории покровного палео-оледенения района.

В ходе этой морской экспедиции были детально изучены 13 полигонов (рис. 1). На каждом из них предварительно проводился комплекс геофизических исследований, по результатам которого были выбраны конкретные точки для геологического опробования. Задачи работ включали характеристику донных грунтов, выявление в толще донных отложений фоновых и аномальных концентраций флюидов, а также получение информации о типе и характеристиках флюида в осадках верхней части разреза. Седиментологическим отрядом геологической группы в рейсе проводились донный пробоотбор осадков с помощью гравитационной трубки, зачистка и фотографирование керна, его первичное литологическое описание и консервация, а также составление на основе этого описания геологических колонок и корреляционных схем разрезов станций на каждом полигоне.

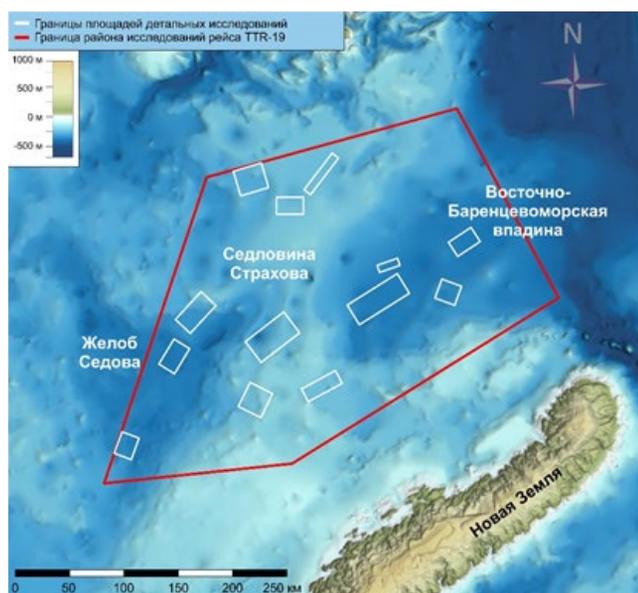


Рис. 1. Карта районов исследований экспедиции TTR-19 в северо-восточной части Баренцева моря. Донный рельеф по IBCAO 4.1 [Jakobsson et al., 2020]

Не одно столетие акватория Баренцева моря привлекает к себе внимание отечественных и зарубежных исследователей. Выделяют 4 периода ее изучения: начальный этап (XIV–XV вв.) соответствует эпохе великих географических открытий и включает общие наблюдения за регионом, второй (XIX — начала XX в.) связан с началом изучения геологического строения, построением карты Баренцева моря с учетом современных очертаний берегов и открытием архипелага Земля Франца-Иосифа, третий (середина XX в.) ознаменовался составлением батиметрической карты и первой геоморфологической карты дна, и, наконец, четвертый этап (конец XX–XXI вв.) — начало детального изучения морских донных осадков, применение геофизических работ на шельфе и первое инженерно-геологическое бурение в исследуемом районе [Гуревич, Мусатов, 2000].

Новейшая геологическая история Баренцева моря несколько десятилетий оставалась предметом дискуссий. Остро стояла проблема генезиса четвертичных отложений [Мурдмаа, Иванова, 1999]. Современные исследователи признают ледниковый генезис большей части разреза низменностей Арктики, что подтверждают древние ледниковые формы рельефа [Гусев и др., 2012]. Но до сих пор существуют две разные точки зрения о ситуации на шельфе Баренцева моря во время последнего ледникового максимума.

Первая гипотеза предполагает развитие единого покровного оледенения на большой территории Арктики и шельфа Северного Ледовитого океана. Считается, что мощный сплошной ледник толщиной более 1000 м покрывал огромные территории и лежал на дне морей нынешнего Северного Ледовитого океана. Некоторые ученые полагают, что этот чрезвычайно толстый многолетний ледяной покров сформировался в конце последнего ледникового периода из-за уменьшения притока теплых атлантических вод [Jakobsson et al., 2014]. Во время многочисленных эпизодов оледенения четвертичного периода на континентальном шельфе Баренцева моря периодически нарастал и, потом, деградировал ледниковый покров [Patton et al., 2015]. Ледники таких повторных оледенений эродировали большую часть шельфа вплоть до коренных мезозойских слоев [Polyak et al., 1994].

Вторая гипотеза предполагает существование в Арктике только ледниковых центров над архипелагами (Франц-Иосифовский, Шпицбергенский, Новоземельский, Скандинавский) и морскими отмелями, между которыми находились впадины — морские бассейны. В эпоху максимума последнего оледенения Баренцево море почти со всех сторон было

окружено ледниками, которые спускались на шельф из таких центров оледенения. В областях, которые не были заняты шельфовыми ледниками, были распространены плавающие льды, а на дне накапливались ледниково-морские осадки. Во время дегляциации образовались аккумулятивные накопления большой мощности [Павлидис и др., 2005].

По результатам картирования четвертичных отложений Баренцева моря было выделено 3 этапа оледенения шельфа: ранний (ранний-средний неоплейстоцен), средний (начало позднего неоплейстоцена) и поздний (конец позднего неоплейстоцена) [Гусев и др., 2012].

В послеледниковой седиментации на шельфе Баренцева моря выделяют до трех основных этапов, соответствующих ранней и поздней стадиям дегляциации и морскому осадконакоплению в голоцене. Главными факторами осадконакопления на ранней стадии являлись вынос тонкого взвешенного материала с тальми водами ледников, широкое развитие гравитационных потоков, а также интенсивный айсберговый разнос. В позднюю стадию дегляциации были развиты процессы придонного перемыва и переноса осадков с формированием ламинированных отложений турбидитов и нефеловидных потоков. Для голоцена характерна нормальная морская седиментация с несколькими этапами, отражающими изменения в поступлении атлантических вод в Баренцево море. В целом послеледниковая история баренцевоморского осадконакопления характеризуется постепенным уменьшением роли ледникового фактора с начала дегляциации, хотя и в настоящее время этот фактор играет определенную роль, особенно в северо-восточной части Баренцева моря [Мурдмаа, Иванова, 1999].

Рельеф дна Баренцева моря характеризуется сильной расчлененностью. Ряд гряд, в том числе и подводные моренные холмы, протягиваются цепочкой и окаймляют архипелаги островов Земли Франца-Иосифа, Новой Земли и Шпицбергена, а также подводные возвышенности (бывшие ледниковые центры) [Гусев и др., 2012; Dowdeswell et al., 2021].

В северо-восточной части Баренцева моря, в 2020 году в ходе 19-го рейса в рамках Международной программы ЮНЕСКО «Обучение-через-исследования (Плавающий университет)» впервые были обнаружены так называемые гляциотектонические пары (англ. «hill-hole pairs») (рис. 2.) — донные подледниковые экзарационно-аккумулятивные образования [Dowdeswell et al., 2021]. Такие гляциотектонические структуры широко известны в разных районах, подвергавшихся покровному оледенению, и описаны, в том числе, для западного

Баренцевоморья [Ottesen et al., 2005; Hogan et al., 2010; Rise et al., 2016]. Считается, что они формировались в результате плакинга под ледниковым покровом относительно небольшой мощности. Взаимная ориентировка сопряженных положительных и отрицательных форм указывает на направление движения палео-ледника. Осадочные холмы всегда располагаются ниже по течению ледового потока, за депрессиями и/или бороздами. Холмы сложены материалом, мобилизованным движущимся ледником при выпахивании соответствующей депрессии, что может быть продемонстрировано прямым сопоставлением объемов отрицательных и положительных форм. По одной из гипотез формирование таких парных образований происходило на участках, где в приповерхностных частях подледникового субстрата образовывались природные газовые гидраты метана [Winsborrow et al., 2016].

Несколько десятилетий проводится бурение инженерно-геологических скважин для изучения донных отложений северных морей. В кернах скважин, пробуренных на Баренцево-Карском шельфе, были вскрыты ледниковые отложения, представленные в основном плотными суглинками, глинами и реже супесями, а также похожие на морену переуплотненные образования, представленные серыми и темно-серыми глинистыми алевролитами с разнообразными включениями песка, гальки и гравия [Гусев и др., 2012].

Установлено, что отложения шельфа Баренцева моря характеризуются преимущественно пылевато-глинистым, иногда песчано-пылевато-глинистым составом. Преобладают глинистые частицы, содержание которых составляет в среднем около 40% (иногда до 95%), также присутствуют пылеватая фракция — 25–30%, а песчаная не превышает 20–25% [Рокос, Люстерик, 1992].

Современные отложения (илы-суглинки) отличаются полиминеральным составом. Песчано-пылеватая фракция представлена кварцем (60–80%), полевыми шпатами (20–30%) и акцессорными минералами (5–10%), а глинистая имеет в различных районах гидрослюдисто-монтмориллонитовый, гидрослюдисто-хлорит-каолининовый и гидрослюдисто-хлоритовый состав. Содержание гидрослюдистых минералов, доминирующими среди которых являются гидромусковит и иллит, варьирует от 21 до 51%, каолинита (8–30%), хлорита (7–21%) и смектита (от 1–2 до 52%) [Рокос, Люстерик, 1992].

В разрезах консолидированных образований верхне-неоплейстоценового комплекса в районах мелководных поднятий Баренцева моря величина переуплотнения OCR (от англ. “overconsolidation ratio”) не превышает 10–15 единиц. Среди отло-

жений ниже-средне-неоплейстоценового комплекса выделяются переуплотненные, преобладающие в нижней и средней пачках и характеризующиеся высокими значениями OCR — до 15–20 единиц. Нормально уплотненные отложения встречаются в верхней пачке комплекса. В переуплотненных разрезах фиксируются консолидированные напоминающие морену образования, имеющие высокую прочность и плотность. В нормально уплотненных разрезах отмечается постепенное замещение текучих — текучепластичных разностей мягко — тугопластичными в интервале мощностью в несколько десятков метров. В пределах Куренцовской террасы, Канинского и Гусиног желобов плотность осадков изменяется от 1,30 до 1,70 г/см³, естественная влажность от 40 до 80%, а коэффициент пористости от 0,8–0,9 до 2–3 и более [Рокос, Люстерик, 1992].

В настоящей статье представлены результаты исследований донных четвертичных глинистых отложений северо-восточной части Баренцева моря, включая характеристику их минерального состава, физических и физико-химических свойств, а также параметры их переуплотнения.

Характеристика исследованных донных грунтов

В ходе рейса TTR-19 донный пробоотбор выполнялся при помощи ударной прямооточной трубы. Такой пробоотборник внедряется в донные отложения за счет кинетической энергии в условиях свободного падения и снабжен внутренним пла-

стиковым вкладышем для удобства извлечения и хранения керна. Проба донного грунта для лабораторных исследований сохранялась в цельном пластмассовом цилиндре.

В северо-восточной части Баренцева моря на одном из полигонов исследований экспедиции были обнаружены и закартированы сопряженные борозды и холмы (рис. 2) — специфические формы ледникового рельефа, получившие название в русскоязычной литературе «гляциотектонические пары», а в англоязычной — «hill-hole pairs». В борозде одной из таких форм рельефа (в станции TTR19-AR124G) была отобрана трубка грунта, имеющая общую длину 1,18 м, для исследования изменчивости в разрезе состава и свойств донных неоплейстоцен-голоценовых отложений и определения степени уплотнения грунта в данном месте. В этой же гляциотектонической структуре, на вершине холма (станция TTR19-AR129G), был отобран керн грунта длиной 43 см для определения его физических и физико-механических свойств (рис. 2).

Трубка донного грунта, отобранная на станции TTR19-AR124G (рис. 3), для лабораторных исследований была разбита на 6 секций, приблизительно по 20 см. Отдельно была отобрана проба из интервала 38–58 см для испытаний на сжимаемость.

Керн TTR19-AR124G представлен илистым однородным липким плотным влажным грунтом мягкопластичной консистенции. В интервале 0–11 см отмечен окисленный прослой коричневого

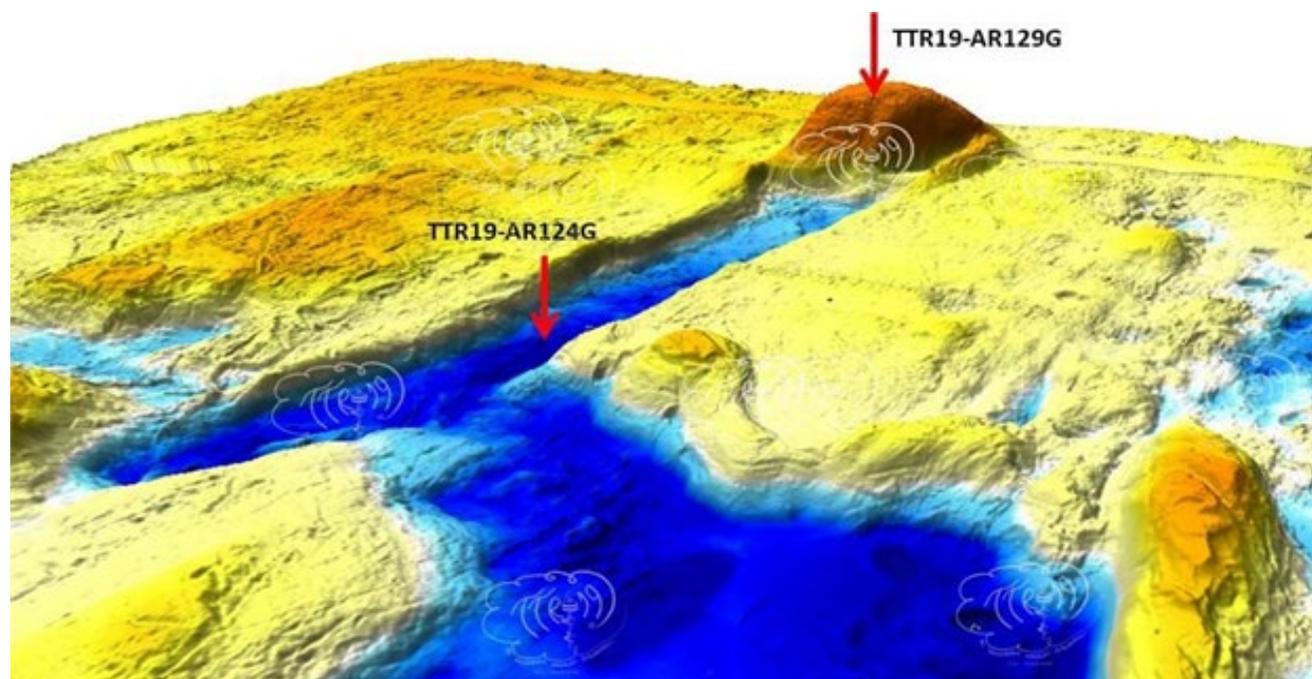


Рис. 2. Трехмерная модель рельефа дна по результатам батиметрической съёмки в экспедиции TTR-19, иллюстрирующая морфологию гляциотектонической пары, обнаруженной и закартированной в северо-восточной части Баренцева моря.

Красные стрелки указывают на местоположения станций донного пробоотбора TTR19-AR124G и TTR19-AR129G



Рис. 3. Керн со станции TTR19-AR124G после раскрытия пластикового тубуса в лаборатории

цвета; ниже, в промежутке 11–18 см — черный, обогащенный органическим веществом слой с характерным запахом сероводорода; далее, до глубины 118 см, грунт имеет однородный серый цвет. Строение комковатое, текстура массивная, слоистость не отмечена. Грунт содержит значительное количество (до 5%) неокатанных фрагментов литифицированных пород дресвяной размерности, а также характеризуется отсутствием видимых макропор и трещин.

Рентгеновская томография донных отложений, отобранных в этой станции, показала (рис. 4), что матрикс грунта неоднородный, плотный и характеризуется невысокой степенью рентгеновской абсорбции — темно-серый цвет на рентгеноплотностных срезах. На томографии отчетливо заметны минералы тяжелой фракции и включения мелких раковин моллюсков, отличающиеся очень высокой степенью поглощения рентгеновского излуче-

ния — белый цвет на рентгеноплотностных срезах, а также включения неокатанного грубообломочного материала размером до 4 см — светло-серые оттенки. В некоторых местах отмечены рыхлые участки и пустоты, связанные с пористостью или с погонофорами.

Трубка донного грунта, отобранного на станции TTR19-AR129G с вершины холма гляциотектонической пары (рис. 2), имела длину 43 см (рис. 5). Пробы для определения параметров переуплотнения в условиях компрессии были взяты из нее из интервалов 17–22 см и 36–40 см.

Керн TTR19-AR129G представлен связным дисперсным, преимущественно глинистым, грунтом однородным плотным влажным пластичным серого цвета. Видимые включения, макропоры и трещины отсутствуют. Строение комковатое, текстура массивная, слоистости не отмечено.

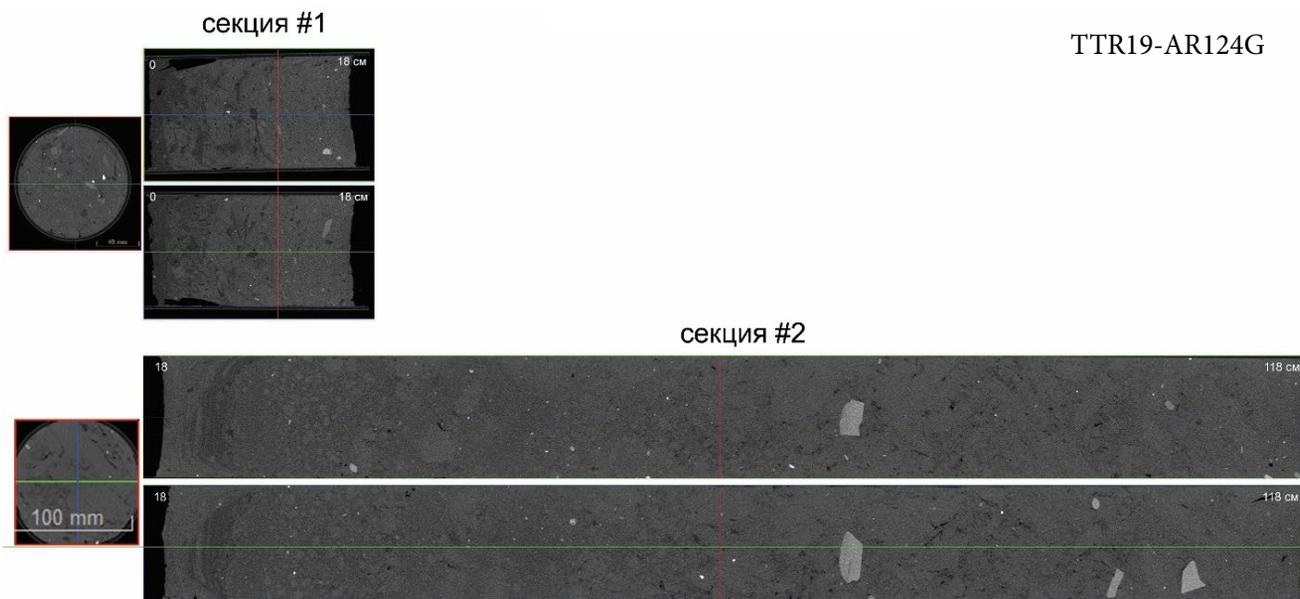


Рис. 4. Результаты рентгеновской томографии трубки TTR19-AR124G.

TTR19-AR129G, секция #1



Рис. 5. Керна со станции TTR19-AR129G после раскрытия пластикового тубуса в лаборатории

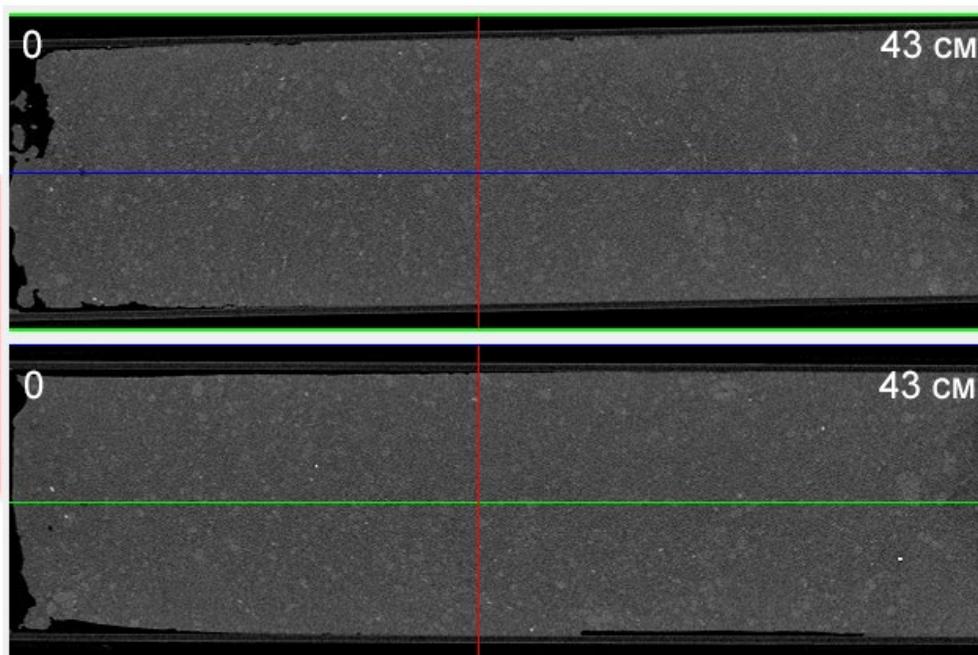
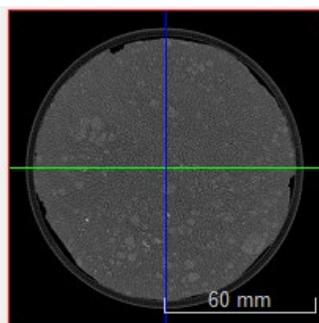
TTR19-AR129G,
секция #1

Рис. 6. Результаты рентгеновской томографии трубки TTR19-AR129G

Для этой трубки донных отложений также была проведена томография (рис. 6), по результатам которой был выявлен плотный матрикс, характеризующийся высокой степенью рентгеновской абсорбции (серый цвет на рентгеноплотностных срезах). В матриксе отмечаются участки-фрагменты с относительно повышенной плотности более светлого оттенка серого и отсутствие крупных включений грубообломочного материала.

Ниже рассматриваются характеристики донных четвертичных грунтов по двум описанным разрезам.

Минеральный состав и содержание органического вещества

Минеральный состав грунтов в изученных интервалах достаточно однообразен (табл. 1) — кварц,

плагиоклаз, полевой шпат и глинистые минералы с примесью карбонатов и аутигенного пирита. Обращает на себя внимание высокое содержание глинистых минералов (36–42%) и их широкий спектр, характеризующийся присутствием минералов разных групп с преобладанием иллита и смешаннослойного образования типа иллит-сметит с разбухающими межслоями.

Содержание водорастворимых солей в разных интервалах опробования составляет около 1% (0,9–1,4%) — слабозасоленные грунты по ГОСТ 25100–2020.

Общее содержание органического вещества, которое влияет на структурирование и агрегирование частиц донных грунтов, определялось двумя способами: методом прокалывания до постоянной массы (ГОСТ 23740–2016) и методом «мокрого

сжигания» (метод Тюрина — по ГОСТ 26213–91). Исследования показали, что содержание органического вещества в грунтах из борозды (станция TTR19-AR124G) варьирует от 8 до 21% по первому и от 1 до 2,3% — по второму методу, что намного больше, чем в пробах с вершины подводного холма, станция TTR19-AR129G (около 7% и 0,16%, соответственно). Вероятно, различия между данными по разным методам можно объяснить тем, что прокаливание при $350 \pm 10^\circ\text{C}$ вызывает, возможно, не только выгорание органического вещества, но и разложение солей (карбонатов, галоидов), а также удаление всей связанной воды. Таким образом, содержание органического углерода надежнее принимать по методу Тюрина. Возможно, органическое вещество, содержащееся в отложениях, вскрытых станцией TTR19-AR129G, в большей степени окислено или минерализовано. И это косвенно может указывать на то, что грунты, отобранные с подводного холма более древние, чем грунты из борозды изученной гляциотектонической пары.

Дисперсность грунтов

Все исследованные грунты характеризуются высокой дисперсностью: по данным гранулометрического анализа (по ГОСТ 12536–2014) более 50% частиц имеют эквивалентный диаметр менее 0,01 мм (рис. 7), а более 40% частиц — менее 5 мкм, что хорошо согласуется со значительным количеством глинистых минералов в минеральном составе. Несколько меньшей дисперсностью выделяются верхние 17–18 см в обеих станциях.

Сопоставление данных гранулометрического и микроагрегатного анализов (рис. 8) показывает некоторую агрегированность глинистых и тонкопылеватых частиц, проявляющуюся преимущественно во фракциях 0,01–0,05 мм и 0,1–0,25 мм.

Влажность, физические и физико-химические свойства грунтов

Изучение состояния и свойств грунтов по колонке из борозды гляциотектонической пары выявило (табл. 2) небольшие вариации показателей при общем тренде к сокращению пористости и влажности вниз по разрезу и увеличению плотности с глубиной. Естественная влажность изученных грунтов меняется в пределах 27–33%, пористость — от 44 до 39%. Вариации других показателей не носят закономерного характера. Полученные вариации показателей свойств этих грунтов связаны с изменениями по разрезу минерального и гранулометрического составов, а также присутствием в отдельных интервалах неокатанного грубообломочного материала и включений карбонатных раковин моллюсков. Соответствующие характеристики для грунтов, отобранных с вершины холма гляциотектонической пары, укладываются в схожие пределы.

Число пластичности для всех образцов варьирует от 7 до 13, а показатель текучести — от 0,4 до 1,4. Таким образом, грунты из борозды гляциотектонической пары представлены илами суглинистыми — суглинками [ГОСТ 25100–2020, табл. Б.13] легкими и тяжелыми, пылеватыми, от текучих до мягкопластичных, а грунт, взятый на холме — суглинками тяжелыми, пылеватыми, тугопластичными.

Состав и свойства донного грунта, отобранного из борозды изученной гляциотектонической пары (станция TTR19-AR124G), указывают на его накопление в ледниково-морских (дегляциация) и современных морских обстановках. Такие грунты должны характеризоваться нормальным уплотнением. С вершины сопряженного холма (станция TTR19-AR129G) отобран весьма плотный, возможно переуплотненный, суглинок. Оценке

Таблица 1. Минеральный состав (% по массе) исследованных донных грунтов

Скважина	TTR19-AR-124G						TTR19-AR-129G
	Интервал глубины опробования, см						
	0–18	18–38	38–58	58–78	78–98	98–118	0–17
Кварц	28,7	31,1	30,3	28,4	29,1	30,6	27,3
Альбит	19,3	16,9	14,5	15,6	13,3	13,3	14,6
Микроклин	9,6	9,5	10,4	9,2	12	9,2	13,5
Каолинит	4,7	3,3	6,9	3,1	4,6	4	5,4
Хлорит	7,7	7,1	7,8	12,9	5,6	7,1	7,7
Иллит	8,9	11,3	10,3	11,3	10,8	11,8	6,9
Смешаннослойные минералы типа иллит — смектит	14,6	15,5	14,8	15	19	18,6	21,3
Карбонаты (кальцит, хантит)	6,1	4,8	4,5	4	5	4,6	2,9
Пирит	<0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,8	0,5

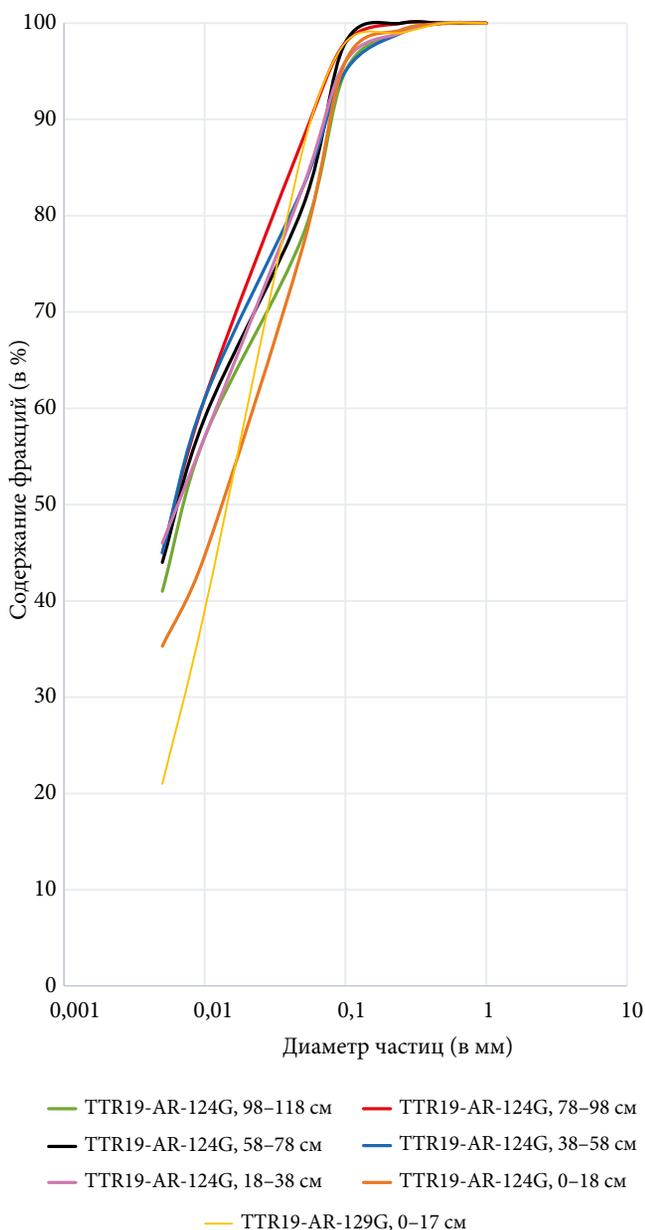


Рис. 7. Гранулометрический состав исследованных образцов донных грунтов

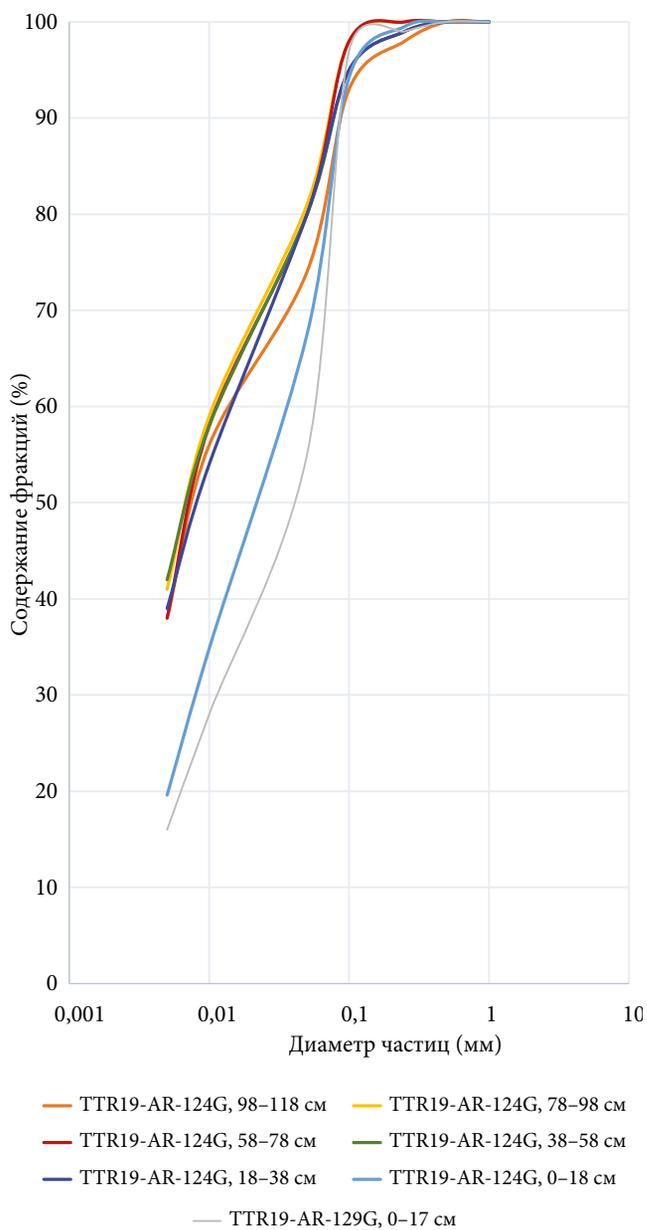


Рис. 8. Микроагрегатный состав исследованных образцов донных грунтов

Таблица 2. Показатели влажности, физических и физико-химических свойств донных грунтов

Показатель	Скважина	
	TTR19-AR-124G Глубина 0–118 см	TTR19-AR-129G Глубина 0–17 см
Влажность W_e , %	27–33	31
Плотность ρ , г/см ³	1,94–2,15	2,00
Плотность частиц ρ_s , г/см ³	2,63–2,73	2,70
Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³	1,52–1,67	1,53
Пористость n	0,39–0,44	0,43
Влажность предела раскатывания W_p , %	20–23	26
Влажность предела текучести W_L , %	29–33	39
Число пластичности I_p	7–12	13
Показатель текучести I_L	0,73–1,43	0,40

степени переуплотнения грунтов посвящена следующая часть работы.

Современные представления о переуплотнении глинистых грунтов и методика определения его параметров

В широком смысле переуплотненными называются дисперсные грунты, которые в условиях их современного залегания испытывают меньшие вертикальные эффективные сжимающие напряжения (σ'_{ov}), чем действовавшие на них ранее в течение их геологической истории (σ'_p). Эта последняя величина обычно называется нагрузкой предварительного уплотнения, а ее отношение к текущему природному давлению — коэффициентом переуплотнения (OCR), который чаще всего и выступает количественной мерой переуплотнения грунта.

Эффекты переуплотнения глинистых пород и закономерности изменения их пористости по разрезу с позиций историко-геологического подхода рассматривались в трудах Н. Г. Кассина (1933), А. С. Храмушева (1933), Ю. В. Мухина (1936), З. А. Макеева (1937), Г. Хедберга (1926, 1936), В. А. Приклонского (1936), Н. Я. Денисова (1951),

В. Д. Ломтадзе (1954, 1958), Дж. Уэллера (1959), Н. Б. Вассоевича (1954, 1955, 1958, 1960) и целого ряда других исследователей.

В механике грунтов первым понятие о переуплотненных грунтах ввел А. Казагранде [Casagrande, 1936], который и предложил использовать компрессионную кривую в полулогарифмическом масштабе. Предполагалось, что характерный перегиб кривой, отвечающий резкому повышению сжимаемости образца при компрессионных испытаниях, соответствует максимальному геостатическому давлению — нагрузке предварительного уплотнения, испытанной породой в прошлом.

Сам факт переуплотнения устанавливается, как правило, в условиях лабораторного компрессионного испытания грунта по заметному повышению его сжимаемости при нагрузках, превышающих давление предварительного уплотнения, что с разной степенью отчетливости выражается перегибом зависимости коэффициента пористости от логарифма эффективного напряжения (рис. 9). Последующая обработка направлена на возможно более точное определение величины нагрузки предварительного уплотнения, что важно для правильного

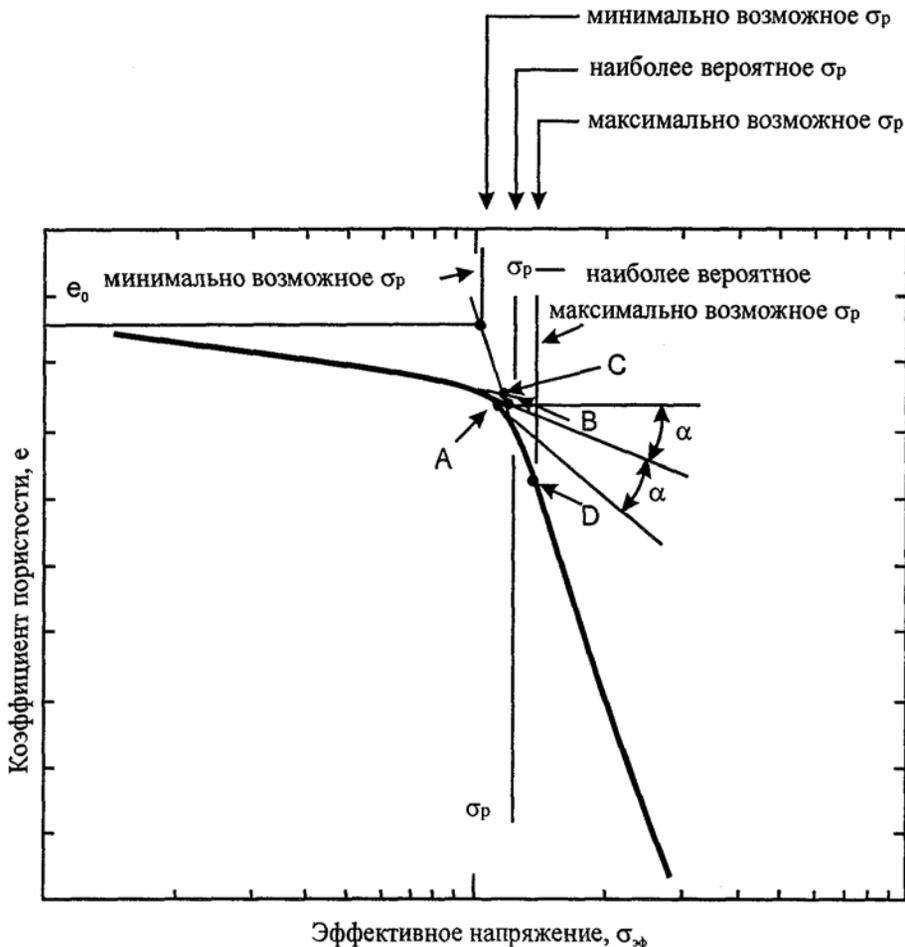


Рис. 9. Схема построений А. Казагранде (1936) для определения давления предварительного уплотнения

описания поведения грунта в разных диапазонах действующих давлений: до достижения величины σ'_p грунт переуплотнен, слабосжимаем, обычно проявляет выраженную дилатансию при значительных сдвиговых деформациях вплоть до разрушения, а свыше этого уровня он становится нормально уплотненным, сжимаемость возрастает, а дилатантные свойства не выражены.

Параметры переуплотнения — σ'_p и OCR — учитываются в некоторых современных моделях деформирования грунта (например, HS и HSSmall), влияют на правильную инженерную оценку поведения основания при взаимодействии с инженерными сооружениями и используются (в частности, OCR) как классификационные показатели. Для определения нагрузки предварительного уплотнения по результатам компрессионных испытаний разными авторами предложен целый ряд методов, весьма полный обзор которых приведен в работе [Труфанов и др., 2014]. Наиболее надежными и широко используемыми считаются графоаналитический метод А. Казагранде (включенный в стандарт ASTM D2435–04) и метод анализа суммарной работы деформаций Д. Беккера [Becker et al., 1987]. Эти же методы включены и в российский стандарт на метод лабораторного определения параметров переуплотнения [ГОСТ Р 58236].

Изменения геологической обстановки должны отражаться на свойствах глинистых грунтов, в том числе на характере поведения их под нагрузкой. Исследуя характер компрессионной кривой, можно до некоторой степени реконструировать геологическую историю образования глинистых пород. Основной причиной залегания переуплотненного грунта на вершине подводного холма является эрозия вышележащих отложений. Это позволяет для условий простого тектонического режима перейти от величины нагрузки предварительного уплотнения к оценке мощности размытых отложений. Например, оценить глубину эрозии можно для условий смены осадконакопления денудацией на фоне устойчивого подъема территории без значительных латеральных напряжений, а также дизъюнктивных или пликативных дислокаций. В такой модели диагенетическое уплотнение осадка сменяется разгрузкой толщи с частичным увеличением пористости за счет упругих свойств породы и набухания. А. С. Храмушев (1939), анализируя перегибы компрессионных кривых, определял мощность когда-то перекрывавших породу отложений. Тем не менее, такой подход не учитывает ряд процессов, проявляющихся в ходе диагенеза и эпигенеза и повышающих прочность породы независимо от испытанного ею давления, а именно синергиче-

ское и тиксотропное упрочнение, дегидратацию и цементацию. Важно понимать, что «переуплотнение» в общем смысле — некий интегральный эффект проявления разных природных процессов. Влияние геостатических нагрузок в геологическом прошлом на уплотнение глинистых толщ отражается на структурных связях глин, которые обладают способностью «запоминать» максимальные напряжения. Это, в свою очередь, отражается на деформируемости и прочности грунтов [Ломтадзе, 1958]. При этом, наряду с сокращением пористости и увеличением общей площади взаимодействия частиц, при уплотнении грунта с исходно коагуляционной структурой происходит и его «старение», под которым подразумевается медленное изменение прочности структурных связей в результате тиксотропного упрочнения, ионообменных процессов и цементации. Результатом этого становится появление переходных и цементационных контактов и возникновение другого типа структуры глинистого грунта, обладающего иными свойствами. И уже прочность новых контактных взаимодействий определяет тот уровень нагрузки, при котором будет зафиксировано заметное повышение сжимаемости грунта в испытании. Большое значение могут иметь изменения свойств грунтов, происходящие при длительном уплотнении. Речь идет о замедленной (или «отложенной», по Л. Бьерруму [Bjerrum, 1967]) вторичной консолидации, которая происходит при относительно постоянной геостатической нагрузке. Степень такой консолидации зависит от времени и *никогда* не воспроизводится в лабораторном эксперименте. Роль возраста глинистой толщи *никак* методически не учитывается при определении характеристик переуплотнения.

Таким образом, эффекты, определяющие изменение свойств грунта при переуплотнении, обусловлены тремя главными причинами: прогрессирующим уплотнением при росте геостатической нагрузки, длительным уплотнением при постоянном давлении в геологическом времени и преобразованием структурных связей на контактах частиц. Другие факторы — вариации порового давления при колебаниях уровня подземных вод, транспирации, изменения температурного режима и др. — могут лишь модифицировать их.

Переуплотнение моренных глинистых отложений Баренцева моря и его возможная природа

По результатам проведенных компрессионных испытаний ил суглинистый — суглинок из донной борозды описываемого района (станция TTR19-AR124G), как и ожидалось, оказался нормально

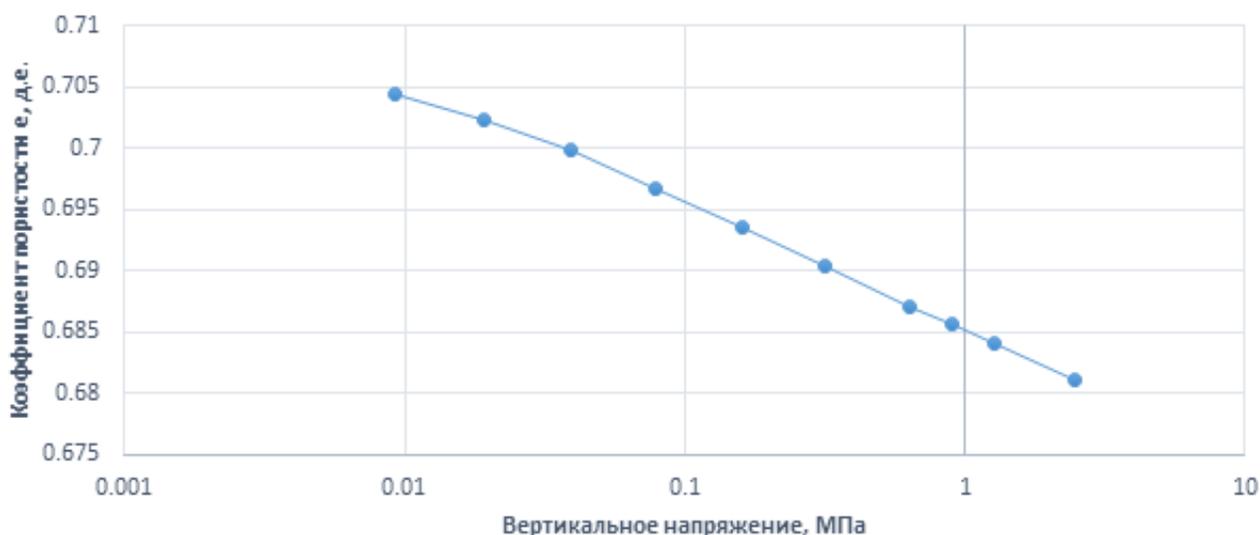


Рис. 10. Компрессионная кривая нормально уплотненного грунта (станция TTR19-AR-124G, интервал отбора образца — 48 см)

уплотненным (рис. 10), что полностью согласуется и с условиями его залегания, и с установленными характеристиками состава и свойств.

В суглинках с подводного холма (станция TTR19-AR129G) установлен эффект переуплотнения. Параллельные испытания проведены для двух проб из интервалов керна 17 и 36 см. После обработки результатов компрессионных испытаний напряжение предварительного уплотнения (σ'_p) для обеих проб составило 280–290 кПа ($OCR = 40–89$), как по методу Казагранде, так и по методу Беккера (рис. 11).

Установленное лабораторными испытаниями переуплотнение грунта, отобранного в станции TTR19-AR-129G с вершины холма гляциотектонической пары, вполне согласуется с предполагаемой природой формирования этой донной структуры. Широкие борозды и сопряженные с ними крупные холмы — типичные формы подледникового рельефа районов покровных оледенений. Подледниковые накопления (тиль) часто изначально весьма плотной консистенции, так как формировались под давлением ледового панциря в несколько сотен метров толщиной. Сверх того, как считается, холмы гляциотектонических пар являются результатом локального выпахивания и последующего сучивания материала на подошве движущегося ледника, что подразумевает особое уплотняющее воздействие со стороны ледовых масс на грунт, который формирует подледниковую возвышенность. Таким образом, переуплотнение осадочного материала, слагающего холм изученной гляциотектонической пары и обнажающегося на его вершине, могли определить особенности ледового седиментогенеза. В постледниковое время на вершине холма не

задерживался осадочный материал, и не сформировались сколько-нибудь значительные по мощности морских грунтов, в отличие от участка борозды, опробованной в станции TTR19-AR-124G, где трубка вскрыла нормально уплотненные постледниковые и современные осадки мощностью более метра.

Также возможно другое объяснение установленного факта переуплотнения грунта на вершине возвышенности. Вне зависимости от своей природы изученный холм — это крупная морфоструктура дна, он возвышается над окружающей шельфовой равниной более чем на 200 м, а его вершина отмечается на глубине всего лишь 41-го м. В четвертичное время уровень воды в Баренцевом море неоднократно снижался по отношению к нынешнему. Следовательно, в какое-то время верхняя часть изученной возвышенности могла экспонироваться субаэрально, а также находиться в прибрежных условиях, в зоне активного волнового воздействия, подвергаясь интенсивной эрозии. Считая, что залегание изученного грунта с эффектом переуплотнения с самого верха подводного холма обусловлено частичным размывом вышележавших отложений, и принимая их плотность равной плотности грунтов, отобранных в станции TTR19-AR-124G из борозды, можно даже оценить мощность эродированной части холма. Она составит 14–15 м.

Выводы

(1) Ледниково-морские и морские (неоплейстоцен-голоцен) отложения, отобранные в северо-восточной части Баренцева моря, предположительно в борозде гляциотектонической пары, представлены илами суглинистыми, переходящими в суг-

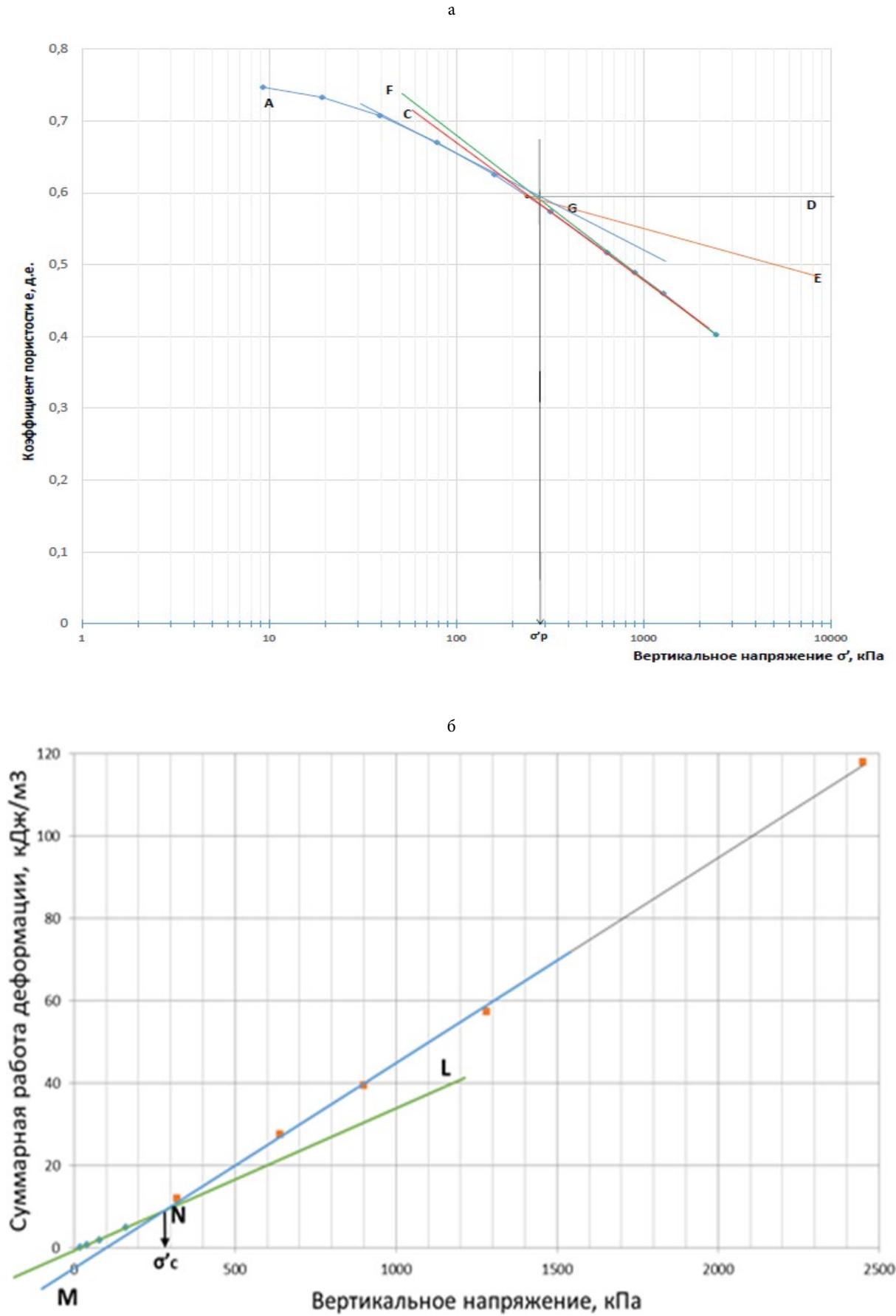


Рис. 11. Результаты обработки компрессионных испытаний суглинка с вершины подводного холма (станция TTR19-AR-129G, интервал отбора образца — 0,36 м) по Казагранде (а) и Беккеру (б). Обозначения линий и ключевых точек соответствуют принятым в ГОСТ Р 58326.

линки, легкими и тяжелыми, пылеватыми, от текучих до мягкопластичных;

(2) Ледниковые моренные грунты, отобранные в Баренцевом море, предположительно на вершине холма гляциотектонической пары, представлены суглинками тяжелыми, пылеватыми, тугопластичными;

(3) Изученные донные грунты характеризуются полиминеральным составом и довольно высоким суммарным содержанием глинистых минералов (36–42%) с преобладанием иллита и смешанно-слоистых образований типа иллит-сметтит с разбухающими межслоями. Содержание органического вещества и водорастворимых солей несколько выше в ледниково-морских и морских отложениях, чем в ледниково-моренных;

(4) В гранулометрическом составе ледниково-морских и морских грунтов преобладающей является фракция <0,005 мм, в ледниково-моренных суглинках преобладает пылеватая фракция.

Микроагрегатный анализ показал определенную агрегированность глинистых и тонкопылеватых частиц, проявляющуюся преимущественно во фракциях 0,01–0,05 мм и 0,1–0,25 мм. Для отложений характерны небольшие вариации физических свойств при общем закономерном тренде к сокращению пористости и влажности, а также увеличению плотности вниз по разрезу;

(5) Согласно результатам компрессионных испытаний, ледниково-морские и морские осадки, накопившиеся в борозде гляциотектонической пары, являются нормально уплотненными. Моренные суглинки, слагающие сопряженный холм, переуплотнены. Нагрузка предварительного уплотнения для них составила 280–290 кПа, а OCR — от 40 до 89. Переуплотнение суглинков может объясняться как, собственно, их моренной природой, так и частичной эрозией, а также сносом перекрывавших их накопленных. Для последнего случая мощность эродированной части оценивается в 14–15 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 26213–91 Почвы. Методы определения органического вещества. М., 1996. 8 с.
- ГОСТ 25100–2020 Грунты. Классификация. М., 2020. 41 с.
- ГОСТ 23740–2016 Грунты. Методы определения содержания органического вещества. М., 2019. 12 с.
- ГОСТ 12536–2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М., 2019. 24 с.
- ГОСТ Р 58326–2018. Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения. Москва. Стандартиформ. 2018. 14 с.
- Гуревич В. И., Мусатов Е. Е. К истории геологического изучения шельфа Баренцева и Белого моря // Известия русского географического общества, 2000. Т. 132, № 6. С. 80–85.
- Гусев Е. А., Костин Д. А., Рекант П. В. Проблема генезиса четвертичных образований Баренцево-Карского шельфа (по материалам Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000) // Отечественная геология, 2012. № 2. С. 84–89.
- Ломтадзе В. Д. Формирование физико-механических свойств глинистых пород при литификации. Автореферат дис. на соискание ученой степени док. геолого-минералогических наук. Москва, МГУ, 1958. 50 с.
- Мурдмаа И. О., Иванова Е. В. Последлениковая история осадконакопления в шельфовых впадинах Баренцева моря // Литология и полезные ископаемые, 1999. № 6. С. 576–595.
- Павлидис Ю. А., Богданов Ю. А., Левченко О. В., Мурдмаа И. О., Тарасов Г. А. Новые данные о природной обстановке в Баренцевом море в конце валдайского ледниковья // Океанология, 2005. Т. 45. № 1. С. 92–106.
- Рокос С. И., Люстерник В. А. Формирование состава и физико-механических свойств плейстоценовых отложений южной и центральной частей шельфа Баренцева моря (генетический и палеогеографический аспекты) — К.: ИГН АН Украины, 92–11, 1992. 60 с.
- Труфанов А. Н., Шулятьев О. А., Ростовцев А. В., Габсалимов Г. У. Методы определения параметров переуплотнения грунтов и их практическое применение в условиях Санкт-Петербурга // Инженерные изыскания. 2014. № 11. С. 32–37.
- Храмушев А. С. Компрессионные испытания глин как метод геологического исследования. ГОНТИ, Ред. гор.-топлив. и геол.-развед. лит.-ры, Москва. Труды Всесоюзной конторы специального геологического картирования. Вып. 3. 1939. 28 с.
- ASTM D2435–04. Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soil using incremental loading. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2004.
- Becker D. E., Crooks J. H.A., Been K., Jefferies M. G. Works as a criterion for determining in-situ and

- yield stresses in clays // *Canadian Geotechnical Journal*. 1987. V. 24. № 4. P. 549–564.
16. Bjerrum, L. Engineering geology of Norwegian normally consolidated clays as related to settlements of buildings // *Geotechnique*. 1967. Vol. 17. P. 214–235.
 17. Casagrande A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. *Proceeding, 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, MA*. 1936. V. 3. P. 60–64.
 18. Dowdeswell J., Montelli A., Akhmanov G., Solovyeva M., Terekhina Ya., Mironyuk S., Tokarev M. Late Weichselian ice-sheet flow directions in the Russian Northern Barents Sea from high-resolution imagery of submarine glacial landforms // *Geology*, 2021. Vol. 49 (12). P. 1484–1488.
 19. Hogan K., Dowdeswell J., Noormets R. Evans J., Ó Cofaigh, C. Evidence for full-glacial flow and retreat of the Late Weichselian ice sheet from the waters around Kong Karls Land, eastern Svalbard // *Quaternary Science Reviews*, 2010, V. 29. P. 3545–3562.
 20. Jakobsson M., Andreassen K., Bjarnadóttir L. R., Dove D., Dowdeswell J. A., England J. H., Funder S., Hogan K., Ingólfsson O., Jennings A., Larsen N. K., Kirchner N., Landvik J. Y., Mayer L., Mikelsen N., Möller P., Niessen F., Nilsson J., O'Regan M., Polyak L., Nørgaard-Pedersen N., Stein R. Arctic Ocean glacial history // *Quaternary Science Reviews*, 2014. Vol. 92. P. 40–67.
 21. Jakobsson M., Mayer L., Bringensparr C., Castro C., Mohammad R., Johnson P., Ketter T., Accetella D., Amblas D., An L., Arndt J., Canals M., Casamor J., Chauché N., Coakley B., Danielson S., Demarte M., Dickson M.-L., Dorschel B., Dowdeswell J., Dreutter S., Fremand A., Gallant D., Hall J., Hehemann L., Hodnesdal H., Hong J., Ivaldi R., Kane E., Klaucke I., Krawczyk D., Kristoffersen Y., Kuipers B., Millan R., Masetti G., Morlighem M., Noormets R., Prescott M., Rebesco M., Rignot E., Semiletov I., Tate A., Travaglini P., Velicogna I., Weatherall P., Weinrebe W., Willis J., Wood M., Zarayskaya Yu., Zhang T., Zimmermann M., Zinglersen Karl. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0 // *Scientific Data*, 2020. Vol. 7:176. P. 1–14.
 22. Ottesen D., Dowdeswell J., Rise, L. Submarine landforms and the reconstruction of fast-flowing ice streams within a large Quaternary ice sheet: The 2500-km-long Norwegian-Svalbard margin (57–80°N) // *Geological Society of America Bulletin*, 2005. V. 117. P. 1033–1050.
 23. Patton H., Andreassen K., Bjarnadóttir L. R., Dowdeswell J. A., Winsborrow M. C. M., Noormets R., Polyak L., Auriac A., Hubbard A. Geophysical constraints on the dynamics and retreat of the Barents Sea ice sheet as a paleobenchmark for models of marine ice sheet deglaciation // *Reviews of Geophysics*. Vol. 53. 2015. P. 1051–1098.
 24. Polyak, L., Solheim, A. Late- and postglacial environments in the northern Barents Sea west of Franz Josef Land // *Polar Research*. Vol. 13, № 2, 1994. P. 197–207.
 25. Rise L., Bellec V., Ottesen D. Bøe R., Thorsnes T. Hill-hole pairs on the Norwegian continental shelf. In: Dowdeswell, J. A., Canals, M., Jakobsson, M., Todd, B. J., Dowdeswell, E. K. and Hogan, K. A. (eds), *Atlas of Submarine Glacial Landforms: Modern, Quaternary and Ancient* // *Geological Society, London, Memoirs*, 2016. Vol. 46. P. 203–204.
 26. Winsborrow M., Andreassen K., Hubbard A., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Patton H. Regulation of ice stream flow through subglacial formation of gas hydrates // *Nature Geoscience*, 2016. Vol. 9 (5), P. 1–6.

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-2-19-27-39>
УДК 624.131.1; 504.064

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА ПРИ ВНЕСЕНИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ФИТОТЕСТИРОВАНИЯ

PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES OCCURRING ON THE SURFACE OF QUARTZ SAND DURING CONTAMINATION AND THEIR IMPACT ON THE PHYTOTESTING RESULTS

© 2022 г. И. Ю. Григорьева¹, А. В. Морозов², М. А. Гладченко³
© 2022 Iya Yu. Grigorieva¹, Andrey V. Morozov², Marina A. Gladchenko³

^{1,2} Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, геологический факультет,
кафедра инженерной и экологической геологии, Ленинские горы, д.1, Москва, 119991, Россия

^{1,2} Department of Engineering and Ecological Geology, Geological Faculty,

Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, bld. 1, Moscow, 119992 Russia

³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, химический факультет,
кафедра химической энзимологии, Ленинские горы, д.11б, Москва, 119992, Россия

³ Department of Chemical Enzymology, Chemical Faculty, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie gory, bld. 11b, Moscow, 119992, Russia

ikagrigin@inbox.ru¹, morozov8pro@yandex.ru², gladmarina@yandex.ru³

Аннотация: Загрязнение жидкими углеводородами (нефтью и продуктами её переработки) песчаных грунтов, наряду с засолением, является характерным процессом, развитым на обширных территориях, связанных с нефтедобычей. На примере модельных экспериментов с использованием природного кварцевого песка рассмотрено влияние физико-химических процессов, происходящих при попадании в грунт жидких углеводородов и солевого загрязнения, на рост и развитие высших растений при проведении фитотестирования. Показана разнонаправленность влияния нескольких комбинаций загрязняющих веществ и их количества на биологические показатели тест-культуры горчицы белой (*Sinapis alba* L.). На основе анализа теоретических представлений описан возможный механизм процессов, происходящих на границе раздела фаз, представленной в данном случае поверхностью кварцевого песка, при попадании используемых комбинаций загрязняющих веществ в исследуемую грунтовую систему. Высказано предположение, что основной вклад в развитие физико-химических процессов в исследуемой песчаной системе будет вносить наличие аморфного кремнезёма.

Abstract: Contamination of sandy soils with liquid hydrocarbons (oil and products of its processing), along with salinization, is a characteristic process developed in vast territories associated with oil production. On the example of model experiments using natural quartz sand, the influence of physico-chemical processes on the growth and development of higher plants during fitotesting is considered. The observed physico-chemical processes occur when liquid hydrocarbon and salt pollution enter the soil. We have shown the multidirectional influence of several combinations of pollutants and their amount on the biological parameters of the test culture of white mustard (*Sinapis alba* L.). Based on the analysis of theoretical concepts, a possible mechanism for regulating the processes occurring at the phase interface when the used combinations of pollutants enter the studied soil system is described. It is suggested that the main contribution to the development of physico-chemical processes in the investigated sand system will be made by the presence of amorphous silica.

Ключевые слова: кварцевый песок, аморфный кремнезём, углеводородное загрязнение, засоление, фитотестирование

Keywords: quartz sand, amorphous silica, hydrocarbon pollution, salinization, phytotesting

Введение

При современном уровне техногенного воздействия на все компоненты природной среды исследователям различных областей знаний, в том числе и наук о Земле, всё чаще приходится сталкиваться с так называемыми загрязнёнными средами. Следует иметь в виду, что в общем виде загрязнение — это поступление в окружающую природную среду любых твердых, жидких и газообразных веществ, микроорганизмов или энергий в количествах, вредных для здоровья человека, животных, состояния растений и экосистем [16]. Иными словами, наличие загрязнения в анализируемой среде следует оценивать по уровню его биологической значимости. К сожалению, до сих пор оценка биологической значимости загрязнения в исследовательской и изыскательской практике, по сложившейся традиции, ведётся преимущественно на основе химико-аналитических исследований с применением нормированных показателей ПДК, ПДС, расчётом Z_c и т. д. Однако необходимо твёрдо понимать, что нормировать и привести в соответствие все возможные комбинации и виды потенциально загрязняющих веществ невозможно. Так, по оценочным данным, в настоящее время нормировано лишь 0,01% потенциально токсичных веществ [23].

Подобная ситуация диктует необходимость разработки методических подходов к оценке биологической значимости уровня и состава загрязнения в том числе и для дисперсных грунтов. Познавание механизма поведения загрязняющих веществ в грунтовой системе даёт ключ к пониманию той биологической значимости, которое то или иное загрязнение способно оказывать на живые организмы. При этом немаловажное значение имеют процессы, происходящие на поверхности минеральных частиц грунта.

Одним из сложных с позиций познания природы происходящих взаимодействий является углеводородное загрязнение. Это связано как с разнообразием, непостоянством его состава, так и с наличием сопутствующих загрязняющих веществ. Так, по данным Ю. И. Пиковского [20] и Н. П. Солнцевой [24], на территории нефтепромыслов углеводородному загрязнению предшествует хлоридно-натриевое.

В большей степени углеводородному загрязнению, в силу своих свойств и значительной распространённости, подвергаются песчаные грунты. Это связано, в первую очередь, с широким их развитием на территории нефтепромыслов и активным использованием при технологическом обустройстве кустовых площадок, нефтедобывающих скважин [4, 13, 18]. Кроме того, большинство нефтешламов

представлено, как правило, песчаными грунтами. В пределах населённых пунктов пески подвергаются наибольшему загрязнению из-за высокой проницаемости, так как в геологическом разрезе территории именно толщи песчаных грунтов являются основными каналами миграции линз жидких углеводородов, образовавшихся при авариях или систематических утечках [8, 9].

Вопросам изучения особенностей углеводородного загрязнения посвящено достаточно большое количество работ, среди которых можно отметить исследования Ю. И. Пиковского [20], Н. П. Солнцевой [24], В. Ж. Аренса [2], А. З. Саушкина [22], Р. Г. Мотенко [17], А. А. Зубайдуллина [11], К. И. Лопатина [14], В. И. Толстого [26] и ряда других авторов. Несмотря на особую актуальность проблемы, ввиду исключительной её многоаспектности, многие вопросы, связанные с оценкой опасности углеводородного загрязнения дисперсных грунтов вообще, и песчаных грунтов в частности, до сих пор остаются слабо изученными, в то время как достаточно много публикаций посвящено изучению загрязнения жидкими углеводородами водных сред и почвенных горизонтов.

Целью настоящей работы было выявление на основе создаваемых физических моделей механизма взаимодействия жидких углеводородов и раствора хлорида натрия с поверхностью песчаных частиц и последующая оценка биологической значимости вносимого в исследуемый песчаный грунт загрязнения.

Физико-химические особенности взаимодействия поверхности кварцевых зерен с водой

Поверхность является одним из самых загадочных и сложных объектов живой и неживой природы [27]. Исследование поверхностных явлений требует междисциплинарного подхода, в то же время изучение поверхности имеет собственную специфику в каждой из естественных наук.

Природные грунты представляют собой гетерогенную физически и химически активную динамичную систему с постоянно изменяющимся термодинамическим равновесием [25]. На межфазной поверхности грунта идут различные химические и физико-химические процессы, такие как гидролиз, адсорбция, осмос, ионный обмен. Развитие их зависит от дисперсности твердой фазы и заметно возрастает с увеличением суммарной удельной поверхности грунтовой системы. Суммарная удельная поверхность грунтовой системы, в свою очередь, определяет величину поверхностной энергии грунта, которая будет во многом зависеть от

содержания в нём частиц коллоидной размерности. Широко известным является факт, установленный К. К. Гедройцем [25]. Так, согласно выполненным им расчётам, удельная поверхность 1% (по весу) коллоидных частиц (размером менее 0,1 мкм) равна удельной поверхности всех остальных 99% гранулометрических элементов.

Кварц является одним из самых распространенных минералов. Размер зерен кварцевого песка не позволяет им вступать в химические и физико-химические взаимодействия самим по себе [6, 25, 27]. Участие поверхности кварцевого песка в данных процессах обеспечивает наличие лабильных соединений кремния, представленных аморфным кремнеземом. Изменение характера поверхности кварцевых зерен может происходить под воздействием самых разных процессов, например, механического разрушения их структуры или в ходе биологического выветривания за счет деятельности микроорганизмов и грибов [1, 15]. Так в работе Н. П. Белкановой, Г. И. Каравайко и З. А. Авакян [5] при оценке влияния микроорганизмов на разрушение силоксанной связи кварца, для чистоты эксперимента и во избежание наличия на поверхности песчаных зерен аморфного кремнезема, прибегали к дроблению монокристалла кварца, многократным промывкам дистиллированной водой и стерилизации сухим жаром при температуре 160–180°C в течение 2 часов. Только подобная подготовка позволила исследователям избежать наличия слоя аморфного кремнезема на поверхности кварцевых зёрен.

Аморфный кремнезем по своим уникальным свойствам схож с водой. Как указывают W. A. Weyl и E. C. Marboe [40], некоторые свойства воды и кремнезема настолько схожи, что наблюдается постепенный переход между гидратированными кремневыми кислотами и матрицей воды. Вода имеет значительно меньшую плотность, чем это следует из представления о плотной упаковке атомов, при этом молекулы воды образуют достаточно открытую кварцеподобную структуру [1]. Многие

исследователи [1, 33] отмечали сходство структуры кремнезема и воды, из этого следует, что между этими веществами возможны различные химические и физико-химические процессы.

При взаимодействии поверхности кремнезема с водой в различных соотношениях могут находиться 5 видов групп (рис. 1):

1. Силанольная (связанная) вода — свободные, отдельно стоящие *ОН*-группы (а);
2. Физически связанная вода — молекулы воды, имеющие водородные связи с силанольными группами (б);
3. Дегидратированные оксиды — силоксановые группы (в);
4. Блинецовые (геминальные) группы *ОН*, связанные с одним атомом кремния (г);
5. Реакционноспособные вицинальные группы *ОН*, преобладающие в тонкопористых кремнеземах — соседние, близко расположенные *ОН* группы, связанные между собой водородной связью (д) [27, 37].

Молекулы воды адсорбируются только на поверхности, содержащей гидроксильные группы. Адсорбция молекул воды на силоксановой поверхности не происходит. Исследованиями в области химии неоднократно показано, что полностью дегидроксилированная поверхность кремнезема гидрофобна. Превращение же силанольных групп в силоксановые и обратно — полностью обратимый процесс (рис. 2) [1].

Аморфный тонкодисперсный кремнезем обладает максимальной растворимостью среди содержащих кремний минералов (50–60 мг $\text{SiO}_2/\text{л}$). При увлажнении грунтовой системы происходит переход аморфного кремнезема в моно- и поликремниевые кислоты [15]. Монокремниевые кислоты в условиях нейтральной щелочной среды, как в исследуемом грунте, достаточно неустойчивы и в процессе конденсации переходят в полиформы. Цикл соединений кремния в грунтовой системе представляет собой цепочку обратимых процессов гидратации и полимеризации.

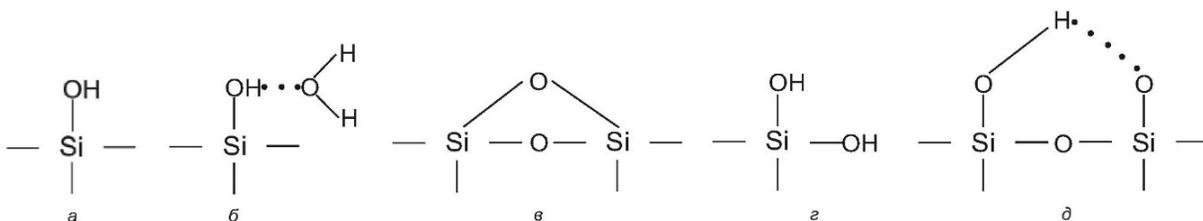


Рис. 1. Виды функциональных групп на поверхности кремнезёма [21, 31] (пояснения в тексте)

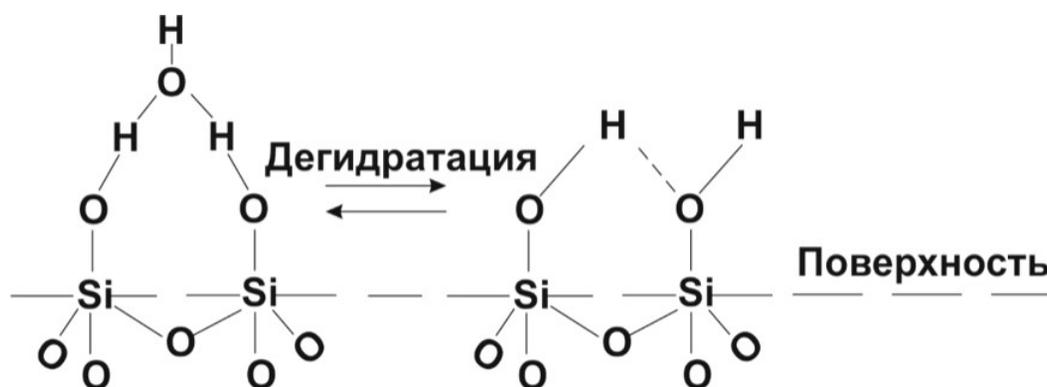


Рис. 2. Обратимый процесс дегидратации реакционноспособных vicинальных групп на поверхности аморфного кремнезёма (по Р. Айлеру) [1]

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на образцах чистых хорошо отсортированных мелко-среднезернистых песков (по классификации Е. М. Сергеева) [25], отобранных с глубины 2,0–2,5 м в пределах крупнейшего в стране Люберецкого месторождения высококачественных кварцевых песков. В соответствии с установленными датировками [21], кварцевые пески Подмосквья образовались в прибрежных зонах древних морей и встречаются в нижнемеловых и верхнеюрских отложениях. Используемые для исследования пески относятся к волжскому ярусу верхнеюрской системы (J3v). В минеральном составе исследуемых песков по данным рентгеноструктурного анализа¹ содержится 98,6% кварца, 1,1% слюдяных минералов и 0,3% каолинита. Содержание подвижной кремнекислоты в исследуемом песчаном грунте определялось экспериментально по методу К. К. Гедройца [6]. Метод основан на образовании растворимого метасиликата и алюмината калия при взаимодействии с 5%-ным раствором щелочи KOH (рис. 3а). Последующее осаждение кремнекислоты осуществлялось солянокислым методом. В ходе эксперимента органические примеси удалялись азотной кислотой и перекисью водорода. Содержание кремнекислоты определялось гравиметрическим методом (рис. 3б), а в полученном фильтрате аммиачным методом определялись полуторные оксиды. За содержание аморфного кремнезема принималось количество, не связанное с Al_2O_3 , в соотношении, отвечающем формуле каолинита [3].

В качестве загрязняющих веществ были использованы дизельное топливо и водный раствор хлорида натрия (поваренной соли). Выбор углеводородного загрязнителя связан с достаточно широким его производством и использованием (порядка 48% от общего объема нефтепродуктов) [39]. В основном дизельное топливо состоит из трех классов углеводородных соединений: парафиновых (20–30%), нафтеновых (35–40%) и ароматических (25–30%). В экспериментах использовалось зимнее топливо, содержащее порядка 17% ароматических углеводородов. Использование дизельного топлива позволило избежать, в отличие от сырой нефти, присутствия легкокипящих соединений и проявления эффектов частичного испарения [10], что дало возможность считать состав загрязнителя постоянным на протяжении всех исследований. Для исходных (контрольных) песков, а также для выборочных вариантов моделей загрязнённых образцов были проведены электронно-микроскопические исследования².

Модели природного загрязненного грунта создавались путём добавления необходимых навесок загрязнителей в чистый воздушно-сухой грунт. Было приготовлено 15 модельных смесей, включая контрольный вариант (чистый песок без загрязнителя). Схема эксперимента приведена в таблице 1. Варианты углеводородного загрязнения создавались с концентрациями дизельного топлива 1, 3, 5 и 7%. Выбор концентраций вносимого загрязнителя был обусловлен тем, что возможность применения биологического этапа рекультивации

¹ Рентгеноструктурный анализ проведен (методом РДА) и обработан Гараниной С. А. и Закусиным С. В. в лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов, кафедры инженерной и экологической геологии, геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова на оборудовании, приобретенном за счёт средств развития Московского университета.

² Электронно-микроскопические исследования выполнены М. С. Черновым в лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов, кафедры инженерной и экологической геологии, геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова на оборудовании, приобретенном за счёт средств развития Московского университета.

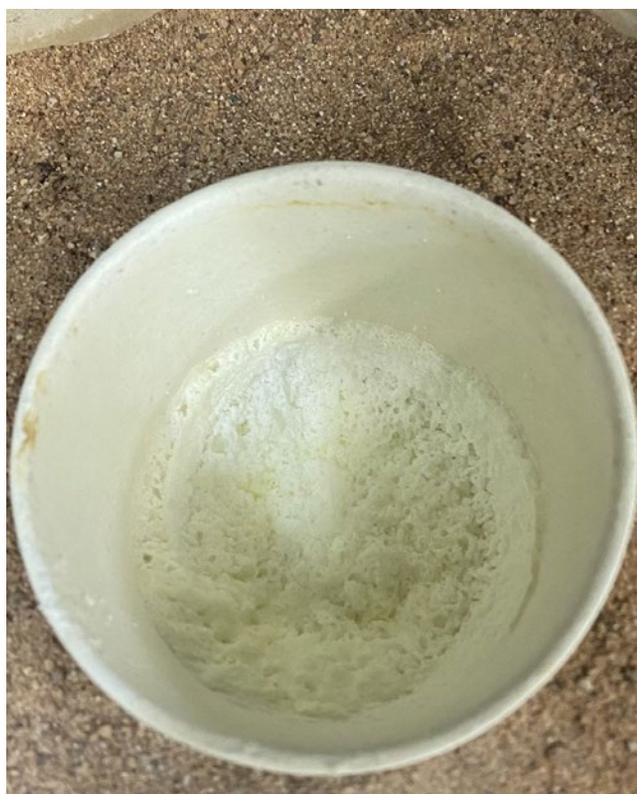


Рис. 3. Характерные этапы определения «аморфных» соединений кремния в исследуемом песчаном грунте по методу К. К. Гедройца: а) выпаренный гель кремниевой кислоты после удаления органических веществ; б) «аморфные» соединения кремния после прокаливания фильтра в муфельной печи.

Таблица 1. Состав и уровень загрязнения приготовленных моделей загрязнённого песчаного грунта

№ пробы	Шифр пробы	Содержание дизельного топлива, % по массе	Содержание NaCl, % по массе
1	Контроль	0	0
2	NaCl 0,1		0,1
3	NaCl 0,5		0,5
4	ДТ 1	1	0
5	ДТ 1 + NaCl 0,1		0,1
6	ДТ 1 + NaCl 0,5		0,5
7	ДТ 3	3	0
8	ДТ 3 + NaCl 0,1		0,1
9	ДТ 3 + NaCl 0,5		0,5
10	ДТ 5	5	0
11	ДТ 5 + NaCl 0,1		0,1
12	ДТ 5 + NaCl 0,5		0,5
13	ДТ 7	7	0
14	ДТ 7 + NaCl 0,1		0,1
15	ДТ 7 + NaCl 0,5		0,5

(с помощью высших растений) ограничена диапазоном, не превышающим 7–10% по массе. Тогда как при более высоких концентрациях (но не превышающих 15% по массе) загрязнённые грунты, согласно существующим нормативам [12], подвергаются термической деструкции. Соль хлорида натрия вносилась в виде водных растворов в концентрации 0,1 и 0,5% по массе. Во всем ряду исследованных концентраций были созданы модельные смеси с комбинированным загрязнением (углеводородным и соевым).

Биологическая значимость уровня и состава загрязнения в исследуемом песке оценивалась согласно ГОСТ Р ИСО 18763–2019 [7]. Исследования велись непосредственно на изучаемом загрязнённом песке аппликатным вариантом планшетного метода (в отличие от элюатного, предполагающего в качестве субстрата для тестирования использование водной вытяжки из грунта) [30, 31]. В качестве тест-культуры использовалась горчица белая (*Sinapis alba L.*), так как она обладает повышенной чувствительностью к острому токсическому воздействию на ранней стадии развития и рекомендована для применения соответствующими нормативами [34, 36, 38]. Оцениваемыми тест-параметрами были показатели всхожести, длины корня и длины



Рис. 4. Пример проведения планшетного фитотестирования с использованием культуры горчицы белой (*Sinapis alba L.*)

ростка [32, 35]. Для каждой модели грунта готовилось не менее трёх планшетов, в каждый из которых высаживалось по 10 семян используемых тест-культур (рис. 4). Всего было высажено более 500 растений. В последующем проводилась соответствующая статистическая обработка данных.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Электронно-микроскопические исследования исходного песчаного грунта позволили оценить характер поверхности зерен кварца (рис. 5), на которой содержится большое количество неровностей и дефектов, а также присутствуют частицы кварца коллоидного размера (рис. 6). Экспериментальная оценка (по методу К. К. Гедройца [6]) содержания лабильных соединений кремния в исследуемом песчаном грунте показала, что количество массовых долей «аморфного» кремния в исследуемой грунтовой системе составляет $0,45 \pm 0,01\%$ по массе³. Данный факт даёт основание полагать, что именно эти соединения обеспечивают реакционную способность и возможность протекания химических и физико-химических процессов в исследуемой песчаной грунтовой системе.

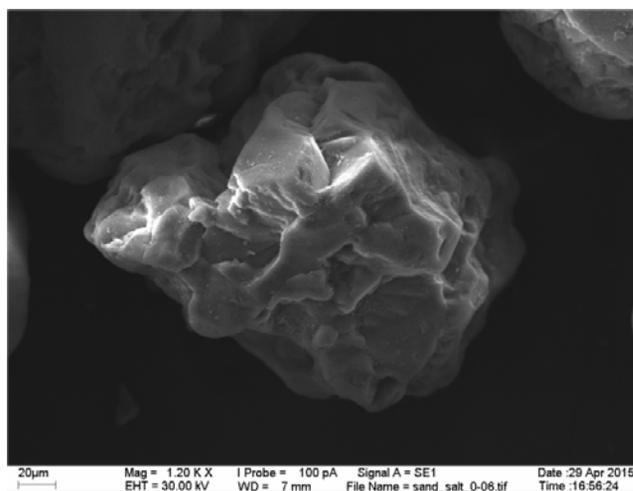


Рис. 5. Морфологические особенности поверхности зерен используемого чистого хорошо отсортированного мелко-среднезернистого кварцевого песка

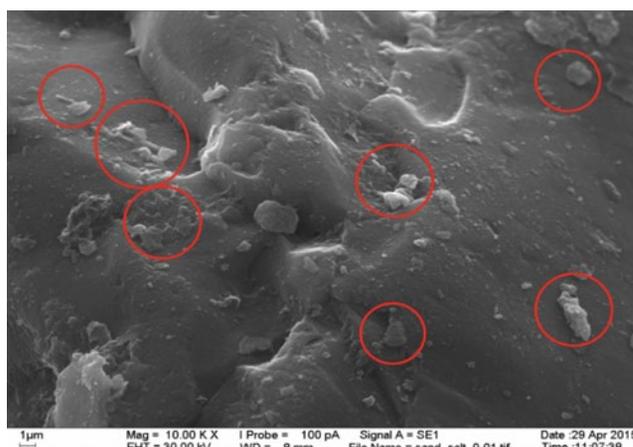


Рис. 6. Частицы коллоидной размерности на поверхности зерна кварцевого песка

Механизм взаимодействия раствора хлорида натрия (NaCl) с поверхностью кварцевых зерен. Процесс растворения кристаллов хлорида натрия (NaCl) в воде происходит за счет гидратации ионов натрия и хлора, молекулы воды окружают ионы и в таком состоянии они находятся в песчаной грунтовой системе. По представлениям Р. Айлера [1], подтверждением факта гидратации иона натрия в водном растворе является то, что при адсорбции иона натрия на поверхности частицы аморфного кремнезема один или несколько атомов кислорода молекул гидратной воды могут замещаться атомами кислорода, принадлежащими поверхностным силанольным группам SiOH , так что последние оказываются непосредственно связанными с атомом натрия.

Данные взаимодействия позволяют полагать, что при определенных концентрациях ионов натрия

³ Для сравнения в работах Е. В.Аринюшкиной данная величина для серой лесной почвы составляет 0,33%.

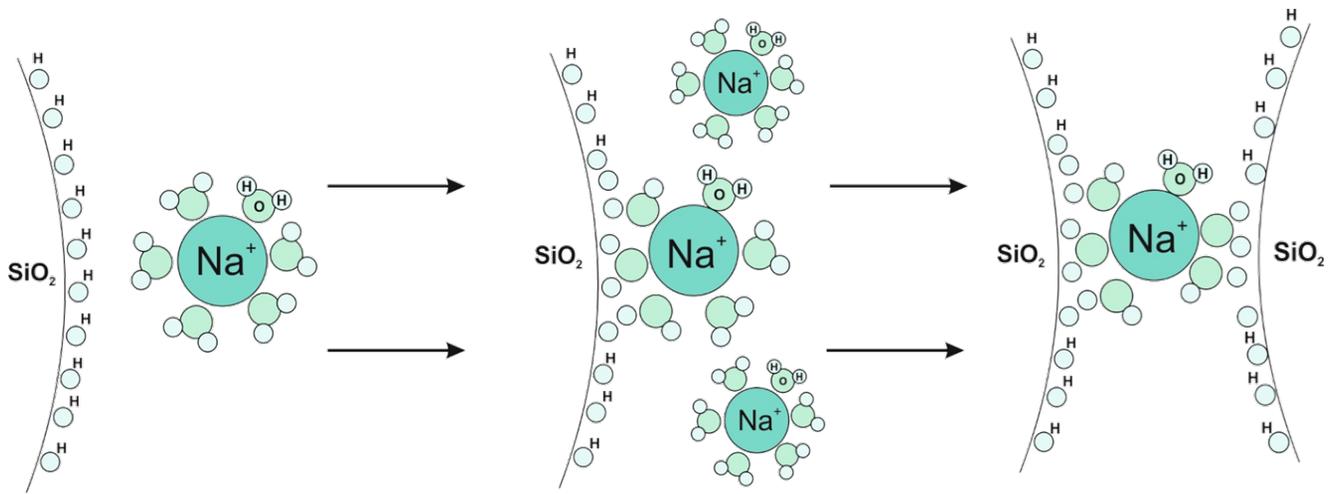


Рис. 7. Схема взаимодействия гидратированного иона натрия с поверхностью аморфного кремнезема

вблизи поверхности частицы возможно замещение одной или более молекул воды, которые до тех пор были связаны с ионом натрия с внешней стороны, а не у поверхности кремнеземной частицы, на поверхностные силанольные группы, принадлежащие второй вступающей в столкновение частицы (рис. 7). Таким образом, ион натрия может способствовать образованию мостиковой связи между двумя частицами, причем контакт двух частиц только в двух точках допускал бы формирование цепочек. Следовательно, с возрастанием числа ионов натрия на поверхности кварцевого зерна, каждая частица может соприкоснуться с окружающими ее другими частицами в трех и более точках (вплоть до шести), что может привести к образованию достаточно массивных агрегатов.

По результатам микроструктурных исследований образцов песчаного грунта при внесении раствора хлорида натрия ($NaCl$) в концентрации 0,5% по массе, наблюдалось изменение характера поверхности кварцевых зерен (рис. 8). Причиной появления подобных структур может являться описанный выше процесс формирования мостиковых связей, детально описанный в классических работах Р. Айлера [1]. Стоит учитывать, что в процессе пробоподготовки для исследования в растровом электронном микроскопе (РЭМ) грунт высушивается, следовательно, в процессе дегидратации амфорный кремнезем, согласно теоретическим представлениям [27], переходит в твердую фазу. Подобные морфологические изменения, а именно изменения характера поверхности кварцевых зерен, вызваны кристаллизацией хлорида натрия из раствора и возможной адгезией мельчайших частиц амфорного кремнезема на поверхности кварцевых зёрен.

Наблюдаемый по результатам фитотестирования острый токсический эффект, оказываемый на биологические показатели (рис. 9) горчицы белой

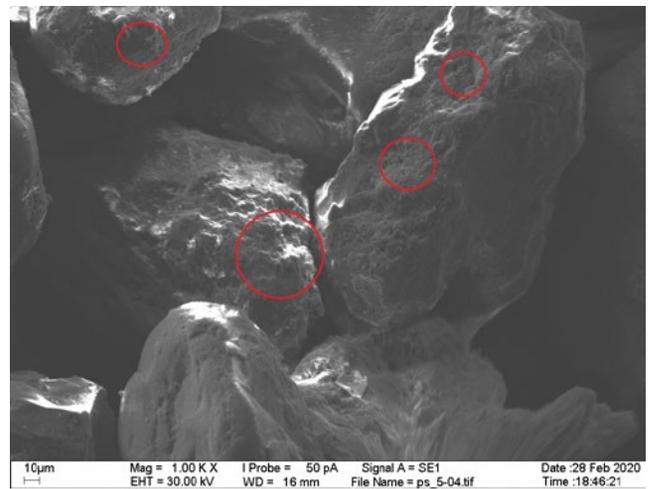


Рис. 8. РЭМ-изображение морфологических особенностей поверхности кварцевых зёрен в модели грунта, загрязненного раствором хлорида натрия ($NaCl$ — 0,5 % по массе)

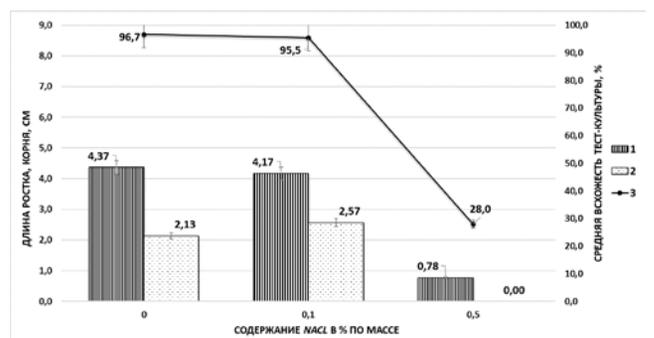


Рис. 9. Зависимость значений исследуемых тест-параметров горчицы белой (*Sinapis alba* L.) от содержания раствора хлорида натрия ($NaCl$) в песчаном грунте: 1 — длина ростка, 2 — длина корня, 3 — всхожесть семян

(*Sinapis* A.), вероятнее всего, связан с незначительной вовлеченностью гидратированного иона хлора во взаимодействие с поверхностью кварца за счет непосредственного нарушения осмотического тока воды в поровом пространстве из-за увеличения

концентрации соли и, следовательно, снижения доступности воды для семени растения. Кроме того, ион хлора (Cl^-) может выступать в качестве специфического яда для используемого высшего растения. Наличие в системе подвижного иона хлора вызывает нарушение ультраструктур клеток, в первую очередь мембранных, что приводит к увеличению их проницаемости [28]. Набухающие семена горчицы белой (*Sinapis A.*) теряют способность к избирательному накоплению веществ, и в процессе развития растения скорость поглощения хлора будет только увеличиваться, что и приводит к подавлению способности к прорастанию.

Механизм взаимодействия углеводородных компонентов дизельного топлива с поверхностью кварцевых зерен. Дизельное топливо представляет собой сложную смесь парафиновых, нафтеновых и сложных ароматических углеводородов. В соответствии с теорией взаимодействия поверхности кремнезема [1], внесение в качестве загрязнителя в песчаную грунтовую систему дизельного топлива инициирует процесс адсорбции за счет физических сил межмолекулярного взаимодействия. Компоненты углеводородного загрязнения образуют водородные связи с поверхностью аморфного кремнезема, однако в случае наличия нескольких точек присоединения молекулы к поверхности, образованные комплексы оказываются настолько стабильными, что их можно рассматривать как хемосорбированные.

Адсорбция полярных молекул или ароматических соединений происходит посредством образования π -связей с поверхностными силанольными группами. Для наиболее стабильного закрепления

полярных молекул поверхность кремнезема не должна содержать адсорбированную воду, так как центрами адсорбции углеводородных компонентов будут группы $SiOH$. Таким образом, при внесении в воздушно-сухой грунт дизельного топлива будет наблюдаться явление физической адсорбции полярных молекул на поверхности кремнезема, дегидратированная поверхность кварцевых зерен будет способствовать образованию водородных связей, и в таком случае данный процесс можно рассматривать как хемосорбцию.

На основании анализа литературных данных [29] можно сделать вывод, что интенсивность процесса сорбции полярных молекул за счет образования водородных связей увеличивается за счет практически полного отсутствия адсорбированной воды на поверхности аморфного кремнезема. Образуются моно- и полислоиные покрытия поверхности кварцевых частиц, причем длина углеводородной цепочки определяет расположение молекулы по отношению к поверхности кремнезема. Молекула бензола будет располагаться параллельно поверхности, как и молекулы ароматических соединений. Сила сорбции на поверхностных $SiOH$ группах в данном случае может быть сравнима с поверхностным натяжением между углеводородами и водой, возникающим на границе раздела фаз.

Для получения представления о толщине слоя сорбированных компонентов углеводородного загрязнения был проведен теоретический расчет, по результатам которого можно полагать, что при внесении дизельного топлива в концентрации 1% по массе в воздушно-сухой песчаный грунт, с учетом принятых допущений, может образоваться около 160 мономолекулярных слоев углеводородных компонентов.

При выполнении электронно-микроскопических исследований образца песчаного грунта, загрязненного дизельным топливом в концентрации 5% по массе, было обнаружено, что поверхность кварцевых зерен приобрела более сглаженный характер за счет эффекта своеобразного «обволакивания» углеводородными компонентами загрязнения (рис. 10). Таким образом, даже при минимальной исследуемой концентрации дизельного топлива возможно полное покрытие удельной поверхности песчаного грунта компонентами углеводородного загрязнения, а увеличение концентрации будет приводить к увеличению толщины слоя сорбированных полярных молекул.

Неоднозначная реакция высшего растения горчицы белой (рис. 11) (*Sinapis A.*) на содержание дизельного топлива в песчаной грунтовой системе,

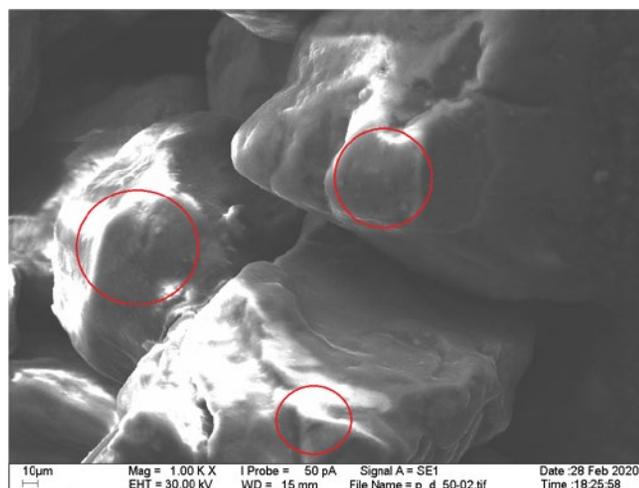


Рис. 10. РЭМ-изображение морфологических особенностей поверхности кварцевых зёрен в модели грунта, загрязненного дизельным топливом (ДТ — 5 % по массе)

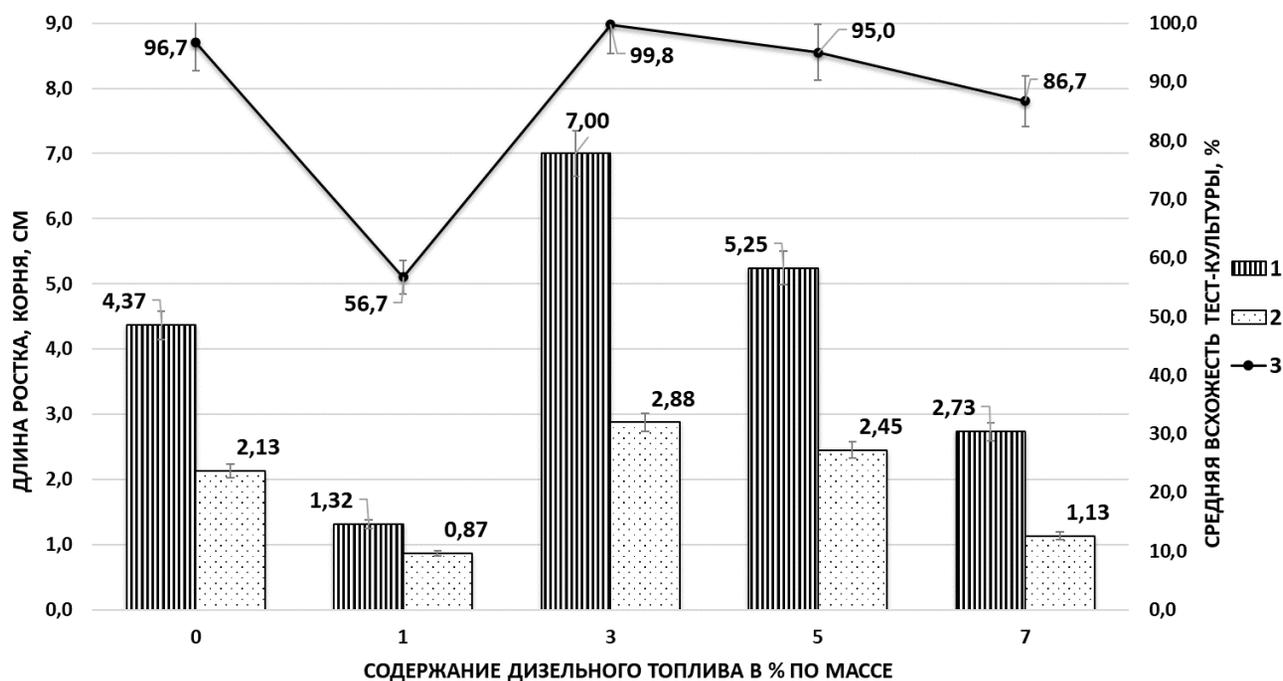


Рис. 11. Зависимость значений исследуемых тест-параметров горчицы белой (*Sinapis A.*) от содержания дизельного топлива в песчаном грунте: 1 — длина ростка, 2 — длина корня, 3 — всхожесть семян

полученная в ходе проведения эксперимента по фитотестированию, может быть описана с базовых позиций концепции пределов толерантности. Стоит отметить, что, в соответствии с представлениями Ю. Одума [19], физиологический подход к оценке влияния факторов среды на условия жизнедеятельности биоты может быть применен к любым живым организмам, а также в отношении любого экологического фактора.

Исходя из общей закономерности реакции тест-культуры горчицы белой (*Sinapis A.*), можно определить, что в отношении содержания дизельного топлива как экологического фактора пределом толерантности является 3–5% по массе. Снижение (1% по массе) или увеличение (7% по массе) концентрации приводит к подавлению биологических показателей. В основу выявления данных закономерностей легла оценка биологического отклика тест-культуры, определяемого по полученным значениям морфометрических показателей (длины ростка и корня).

Механизм взаимодействия комбинированного загрязнения песчаной грунтовой системы с поверхностью кварцевых зерен. Внесение в песчаную грунтовую систему раствора хлорида натрия ($NaCl$) вместе с дизельным топливом приводит к возникновению взаимодействий как между двумя загрязняющими веществами, так и между поверхностью кварцевых зерен и загрязнителями.

Аналогично одиночному загрязнению, внесение углеводородного загрязнения будет сопровождаться процессами физической адсорбции и хемосорбции полярных молекул на поверхности кремнезема. Внесение раствора хлорида натрия ($NaCl$) провоцирует формирование мостиковых и силоксановых связей с поверхностью в присутствии гидратированных ионов натрия (Na^+). Гидратированные ионы хлора могут находиться в поровом пространстве в подвижной форме.

Наличие в растворе гидратированного катиона натрия, может мешать приближаться к поверхности кремнезема молекулам адсорбируемого вещества. Размер гидратированного иона натрия при своем перемещении над заряженным участком поверхности кремнезема препятствует образованию водородных связей органических молекул с поверхностью (рис. 12). Подобные суждения согласуются с предположениями, высказанными в работе Р. Айлера [1].

Как следовало из результатов фитотестирования, на тест-культуру оказывается максимальный токсический эффект именно при использовании в качестве субстрата для роста семян образцов песчаного грунта, загрязненных одновременно дизельным топливом и раствором хлорида натрия. При этом практически полностью ингибировалась способность развития ростков растения, остальные биологические показатели и исследуемые тест-параметры находились на чрезвычайно низком уровне (рис. 13).

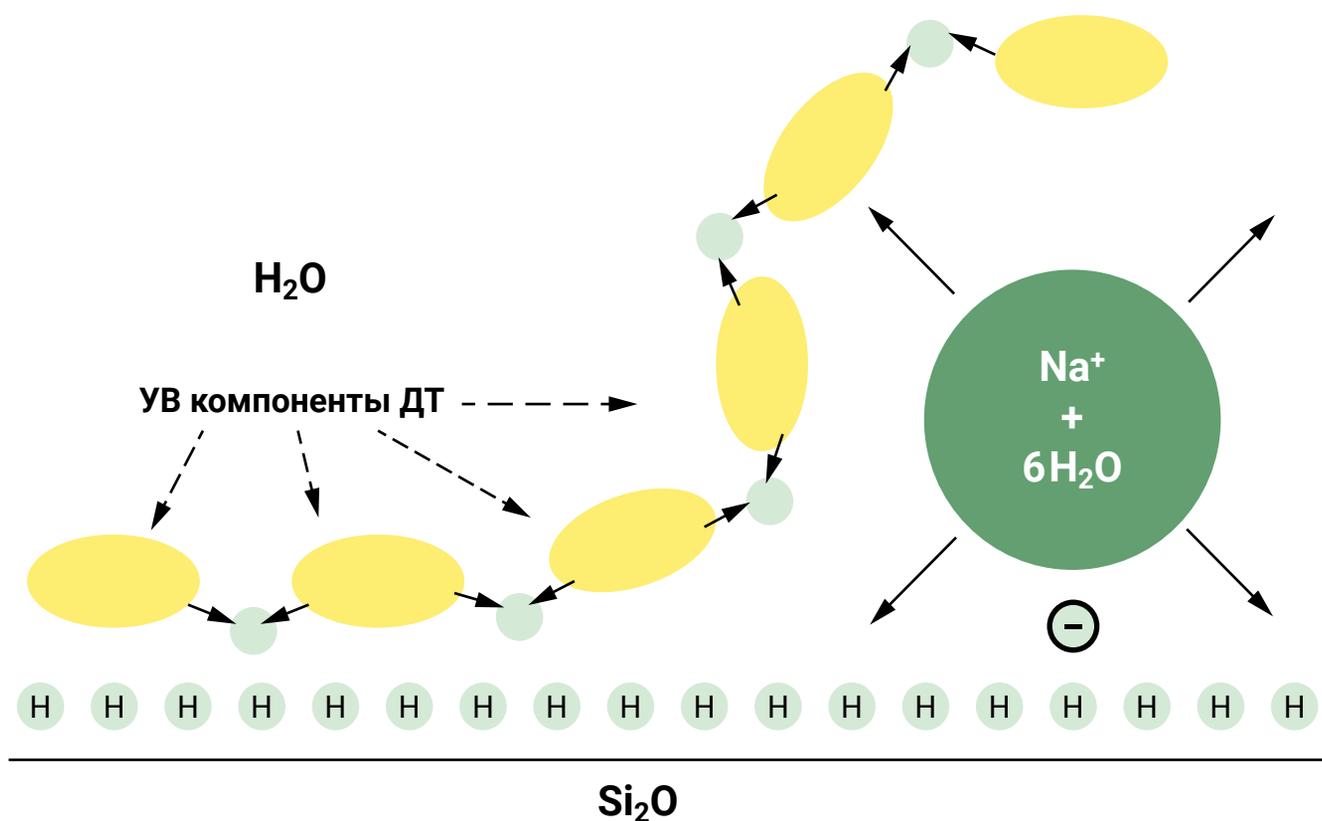


Рис. 12. Схема уменьшения числа водородных связей между молекулой адсорбируемого вещества и поверхностью кремнезема вблизи заряженных участков поверхности

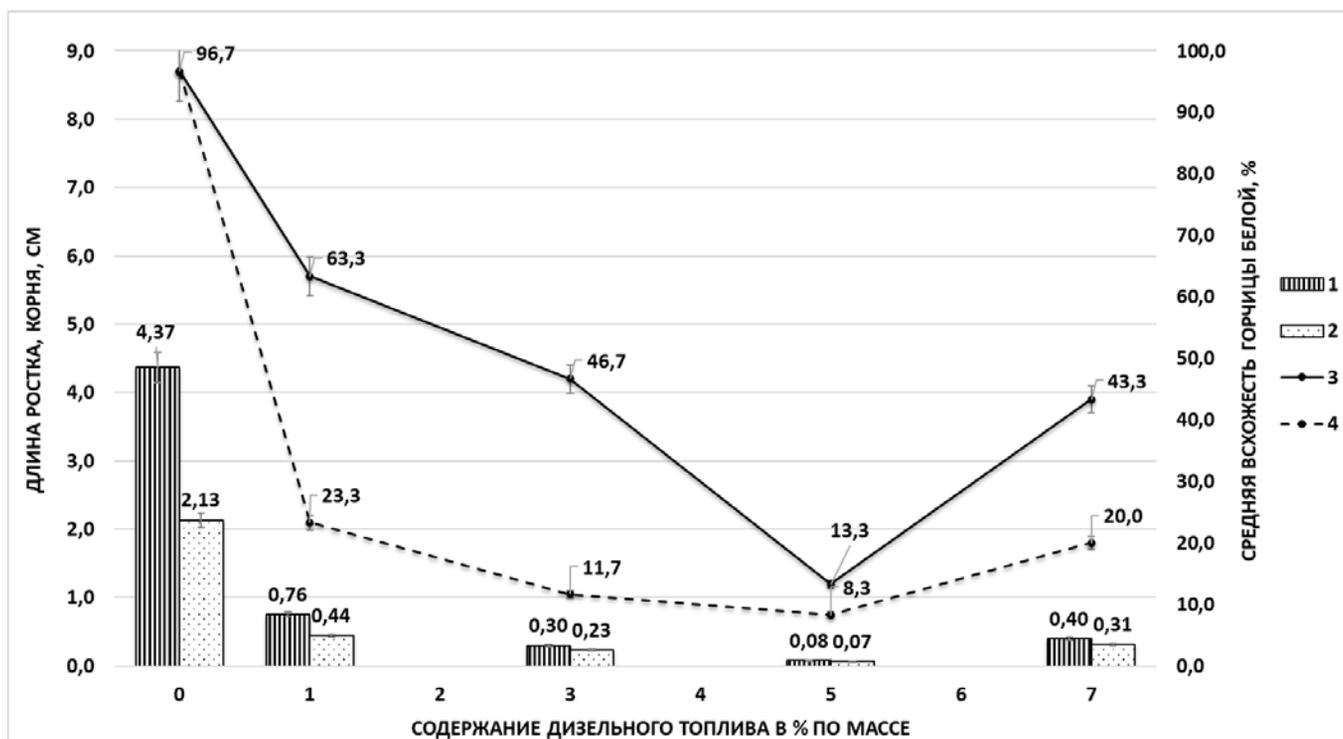


Рис. 13. Зависимость значений исследуемых тест-параметров горчицы белой (*Sinapis A.*) от содержания дизельного топлива и раствора хлорида натрия в исследуемом песчаном грунте: 1 — длина ростка, 2 — длина корня, 3 — всхожесть (в варианте с добавлением NaCl — 0,1% по массе), 4 — всхожесть семян (в варианте с добавлением NaCl — 0,5% по массе)

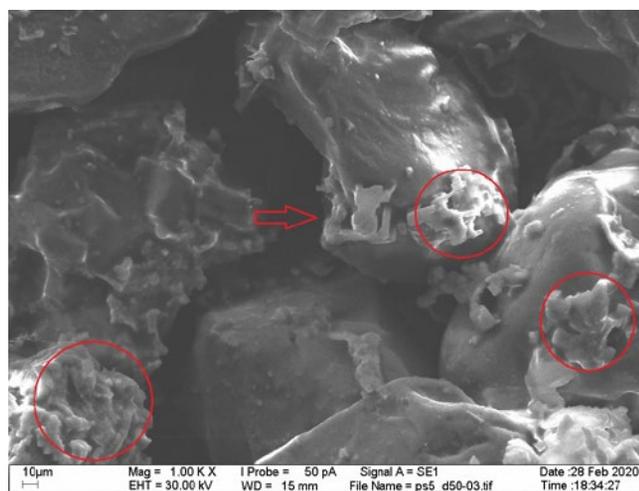


Рис. 14. РЭМ-изображение морфологических особенностей поверхности кварцевых зёрен в модели грунта, загрязненного дизельным топливом (ДТ — 3% по массе) и раствором хлорида натрия ($NaCl$ — 0,5% по массе)

Физическую природу взаимодействия раствора хлорида натрия и дизельного топлива можно рассматривать, в соответствии с базовыми понятиями коллоидной химии [29], как образование эмульсий «соль-дизель» и «дизель-соль», которые при высыхании могут образовывать крупные хлопьевидные кристаллы на поверхности кварцевых зерен. При электронно-микроскопических исследованиях на поверхности кварцевых зерен в высушенном песчаном грунте наблюдались «наросты» с элементами кубических структур, распределенные по отдельным участкам зерен (рис. 14). Форма и размер подобных образований могут подтверждать предположение об образовании хлопьевидных агрегатов в процессе высыхания эмульсий «соль-дизель» и «дизель-соль». Кроме этого, описанный выше процесс, уменьшающий количество образуемых связей, снижающий прочность закрепления компонентов углеводородного загрязнения на поверхности кремнезема, может быть причиной морфологических особенностей поверхности, наблюдаемой на приведенном РЭМ-изображении (рис. 14). Однако химическая и физическая природа возникающих взаимодействий требует дополнительного изучения.

По результатам фитотестирования комбинированное загрязнение песчаной грунтовой системы вызывает острый токсический эффект и сказывается негативно на биологических показателях горчицы белой (*Sinapis A.*) во всем ряду исследуемых концентраций. Подобный сценарий взаимодействия двух загрязнителей, при котором усиливается токсичность каждого из них, называется — синергизм.

Столь острый токсический эффект, даже в случае комбинации отдельно биологически незначимых концентраций дизельного топлива и раствора хлорида натрия, может быть обусловлен влиянием гидратированного иона хлора как специфического яда для исследуемой тест-культуры. Однако химическая и физико-химическая природа возникновения подобного эффекта на данный момент подлежит дополнительному экспериментальному и теоретическому исследованию.

Заключение

Таким образом, взаимодействие поверхности кварцевых зерен с вносимыми в песчаную грунтовую систему загрязнителями в основном обуславливается наличием в системе аморфного кремнезема. Исходя из представлений о форме нахождения «аморфного» кремнезема в воздушно-сухом грунте, можно считать, что его имеющееся содержание (порядка 0,5% по массе), может оказывать влияние на протекание различного рода химических и физико-химических взаимодействий и определять физико-химическую активность веществ-загрязнителей при их внесении в грунтовую систему.

Гидратированные ионы хлора и натрия, образованные в процессе растворения внесенной в песчаную грунтовую систему кристаллической соли ($NaCl$), участвуют в разных химических и физико-химических процессах. Ион натрия (Na^+) активно взаимодействует с поверхностью аморфных частиц кремнезема, способствуя их сближению и формированию агрегатов. В свою очередь наличие гидратированного иона хлора в растворе порового пространства будет определять токсический эффект, оказываемый на исследуемую тест-культуру горчицу белую (*Sinapis A.*), нарушая способность клеток семени к избирательному накоплению веществ в процессе роста и развития.

Загрязнение песчаной грунтовой системы дизельным топливом приводит к прочной сорбции углеводородных компонентов на поверхности кремнезема, что усиливает ее гидрофобность. Различная реакция горчицы белой (*Sinapis A.*) на концентрацию дизельного топлива обусловлена органической природой компонентов загрязнения и содержанием питательных веществ в диапазоне толерантности данного растения. Характер изменения реакции тест-культуры при увеличении и уменьшении содержания загрязнения может быть описан основными положениями закона толерантности о наличии лимитирующего минимума и максимума.

Добавление в песчаную грунтовую систему комбинации дизельного топлива и раствора

хлорида натрия ($NaCl$) приводит к инициации химических и физико-химических сценариев взаимодействия этих веществ-загрязнителей с поверхностью кремнезема, наблюдаемых и при раздельном их внесении. Однако наличие в растворе гидратированного иона натрия (Na^+) может препятствовать процессу адсорбции полярных компонентов углеводородного загрязнения, снижая количество потенциально образуемых водородных связей. Физически при взаимодействии двух загрязняющих веществ образуется эмульсия,

которая при высыхании может образовывать масштабные хлопьевидные структуры на поверхности кварцевых зерен. Проявление острого токсического эффекта комбинированного загрязнения в отношении тест-культуры горчицы белой (*Sinapis A.*) во всем ряду исследуемых концентраций связано с синергизмом двух загрязнителей (усиление токсических свойств друг друга). Химическая и физико-химическая природа проявления данного эффекта требует дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айлер Р. Химия кремнезема: пер. с англ. М. : Мир, 1982. Ч. 1. 416 с.
2. Аренс В. Ж., Гридин О. М., Яншин А. Л. Нефтяные загрязнения: как решить проблему // Экология и промышленность России. 1999. № 9. С. 33–36.
3. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М. : Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
4. Афанасьев С. В., Паис М. А., Носарев Н. С. Нефтешламы как вторичное сырьё // Neftegaz.RU [электронный журнал] № 3, 5, Апрель 2020. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/pererabotka/543315-nefteshlamy-kak-vtorichnoe-syrye/> (дата обращения 05.05.2022).
5. Белканова Н. П., Каравайко Г. И., Авакян З. А. Разрушение силаксанной связи кварца *Bacillus mucilaginosus* // Микробиология, 1985. Т. 54. Вып. 1. С. 27–30.
6. Воробьева Л. А. Теория и практика химического анализа почв. М. : ГЕОС, 2006. 400 с.
7. ГОСТ Р ИСО 18763–2019. Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях развития высших растений // М. : Стандартинформ, 2019. 27 с.
8. Григорьева И. Ю. Эколого-геологические аспекты влияния углеводородного загрязнения на свойства песчаных грунтов // Труды Международной научной конференции «Инженерно-геологическое и эколого-геологическое изучение песков и песчаных массивов». М. : ООО «СамПринт», 2018. С. 218–222.
9. Григорьева И. Ю., Морозов А. В., Садов С. С., Федосеева Е. В. Биодиагностика экологических последствий углеводородного загрязнения песчаных грунтов // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы. Севастополь, 16–18 сентября 2019 г. Т. 1. Воронеж, 2019. С. 187–191.
10. Зильберман М. В., Порошина Е. А., Зырянова Е. В., Биотестирование почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Пермь : ФГУ УралНИИ «Экология», 2005. 111 с.
11. Зубайдуллин А. А. Изучение динамики восстановления растительного покрова на нефтезагрязнённых участках, 2015. URL: <http://www.sibnipirp.ru> (дата обращения — 06.06.2022).
12. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 28–2021. Добыча нефти. М. : Бюро НДТ, 2021. 172 с.
13. Казеннов С. М., Арбузов А. И., Ковалевский Ю. В. Воздействия объектов нефтепродуктообеспечения на геологическую среду // Геоэкология, 1998. № 1. С. 54–74.
14. Лопатин К. И., Каштанова О. А., Монтиле А. И. Оптимизационная модель размещения нефтепромышленных объектов в лесоболотной зоне Западной Сибири // Вестник Нижневартского государственного университета, 2009. № 1. С. 62–67.
15. Матыченков И. В., Хомяков Д. М., Пахненко Е. П., Бочарникова Е. А., Матыченков В. В. Подвижные кремниевые соединения в системе почва-растение и методы их определения // Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение, 2016. № 3. С. 37–46.
16. Меньщиков В. Ф., Яблоков А. В. Загрязнение окружающей среды // Большая российская энциклопедия. Т. 10. М., 2008. С. 168–170.
17. Мотенко Р. Г., Кирюхина Т. А., Гераскина Е. В., Натитник И. М., Лазарева Е. В. Оценка влияния нефтяного загрязнения на теплопроводность грунтов на основе результатов комплексных экспериментальных исследований // Материалы Международной конференции «Город и геоло-

- гические опасности». Ч. 2. СПб., 2006. С. 117–120.
18. Нагорнов С. А., Романцова С. В., Черкасова Л. А. Исследование состава нефтяных шламов // Вестник ТГУ, 2001. Т. 6. Вып. 1. С. 26–28.
 19. Одум Ю. Основы экологии / Пер. с англ. М. : Мир, 1975. 328 с.
 20. Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М. : ИНФРА-М, 2017. 208 с.
 21. Рисуя минералы [сайт]. URL: http://mindraw.web.ru/rod20_geo.htm (дата обращения 21.05.2022).
 22. Саушкин А. З., Аренс В. Ж., Гридин О. М., Гридина О. А. Очистка окружающей среды от углеводородных загрязнений. М. : Изд-во «Интербук», 1999. 371 с.
 23. Смуров А. В. Основы экологической диагностики. М. : Изд-во «Ойкос», 2003. 188 с.
 24. Солнцева Н. П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М. : Изд-во МГУ, 1998. 367 с.
 25. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы / Под ред. акад. Сергеева Е. М. М. : Недра, 1985. 288 с.
 26. Толстограй В. И., Панов В. В., Ямпольский А. Л., Лопатин К. И. Торфяные болота: окружающая среда, ресурсы и политика // Вестник Нижегородского государственного университета, 2009. № 1. С. 46–49.
 27. Химия привитых поверхностных соединений // Под ред. Г. В. Лисичкина. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. 592 с.
 28. Чудинова Л. А., Орлова Н. В. Физиология устойчивости растений: учеб. пособие к спецкурсу / Пермь : Перм. ун-т., 2006. 124 с.
 29. Щукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия: учебник для бакалавров. М. : Изд-во Юрайт, 2013. 444 с.
 30. Alwan S. W. Bioassay of crude oil toxicity in soil and Vecia Faba L. plant // Plant Archives. 2018. V. 18. No. 2. P. 2573–2579
 31. Casseils N. P., Lane C. S., Depala M., Saeed M., Craston D. H. Microtox testing of pentachlorophenol in soil extracts and quantification by capillary electrochromatography (CEC) — A rapid screening approach for contaminated land // Chemosphere. 2000. V. 40. No 6. P. 609–618. [https://doi: 10.1016/S0045-6535\(99\)00322-7](https://doi: 10.1016/S0045-6535(99)00322-7)
 32. David M., Levente K., Sandor A. P., Zsolt K. Applying Bioassays for Investigation of Soils from Suburban Green Sites // CSEE'20. Virtual Conference. 2020. No. ICEPTP 108. P. 1–6. <https://doi: 10.11159/iceptp20.108>
 33. Ephraim F. Inorganic Chemistry, 4th ed., Norde-mann, New York, 1943. P. 399
 34. Marlon E. V., Juan G. F., Francisco P. M. Determination of phytotoxicity of soluble elements in soils, based on a bioassay with lettuce (*Lactuca sativa L.*) // Science of The Total Environment. 2007. V. 378. No. 1–2. P. 63–66. <https://doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.007>
 35. Plaza G., Nalęcz-Jawecki G. The application of bioassays as indicators of petroleum-contaminated soil remediation // Chemosphere, 2005. V. 59. No. 2. P. 289–296. <https://doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.11.049>
 36. Santin-Montanya I., Alonso-Prados J. L., Villarroya M. Bioassay for determining sensitivity to sulfosulfuron on seven plant species // Journal of Environmental science and health. Part B. 2006. V. 41. P. 781–793. <https://doi: 10.1080/03601230600805782>
 37. Snyder L. R., Ward J. W. // J. Phys. Chem. 1966. V. 70. № 12. P. 3941
 38. Susanna S., Laura O., Aldo V. Application of Bio-tests for the Determination of Soil Ecotoxicity after Exposure to Biodegradable Plastics // Frontiers in Environmental Science. 2016. V. 4. Art. 68. P. 1–12. <https://doi: 10.3389/fenvs.2016.00068>
 39. TebizGroup [сайт]. URL: <https://tebiz.ru/pokazateli-rynka-nefteproduktov-v-2020-godu> (дата обращения 05.06.2022).
 40. Weyl W. A., Marboe E. C., The Constitution of Glasses, Vol. 2, Wiley, New York, 1967. P. 1480.

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-2-19-40-50>
УДК 631.4

ЛИТОРИНОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ КАК ПРИРОДНЫЙ СУБСТРАТ ГОРОДСКИХ ПОЧВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

LITTORIN DEPOSITS AS A SOIL-FORMING MATERIAL FOR URBAN SOILS OF ST. PETERSBURG

© 2022 г. К. А. Бахматова¹, А. А. Шешукова², Е. Г. Панова³, С. А. Егорова⁴

© 2022 Kseniia A. Bakhmatova¹, Anastasia A. Sheshukova², Elena G. Panova³, Sofia A. Egorova⁴

^{1,2,3,4} Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия
^{1,2,3,4} Saint Petersburg University, Universitetskaya Emb., 7–9, Saint Petersburg, 199034, Russia

k.bakhmatova@spbu.ru¹

Аннотация: Изучен ряд городских почв Санкт-Петербурга в пределах Литориновой террасы. В почвах по общепринятым методикам определяли pH_{H_2O} , содержание углерода органических соединений, $CaCO_3$ и подвижных соединений фосфора, гранулометрический состав, а также содержание тяжелых металлов (ТМ) — *Pb*, *Cu*, *Zn*. Почвы характеризуются щелочной реакцией среды, повышенным содержанием подвижных соединений фосфора, а также загрязнением ТМ, которое варьирует в зависимости от истории землепользования, отраженной в строении антропогенной толщи. Природные литориновые отложения практически во всех случаях вскрываются под насыпной толщей на глубине 150–190 см, а также присутствуют в качестве мелкоземистого материала горизонтов урбик. Залегающие в нижней части профиля почв литориновые отложения не загрязнены ТМ и могут служить эталоном сравнения для оценки степени загрязнения поверхностных горизонтов.

Abstract: A number of urban soils of St. Petersburg on the Littorina terrace were studied. pH_{H_2O} , the carbon content of organic compounds, $CaCO_3$, and mobile phosphorus compounds, particle size distribution, and the content of heavy metals (HM) — *Pb*, *Cu*, *Zn* were determined in soils according to common methods. The studied soils were alkaline, had an increased content of mobile phosphorus compounds, and were contaminated with HM. HM concentrations varied depending on the history of land use, reflected in the structure of the anthropogenic layers. Natural Littorina deposits commonly were found under anthropogenic layers at a depth of 150–190 cm, and were also present as fine earth material in the urbic horizons. Littorina deposits occurring in the lower part of the soil profile are not contaminated with HMs and can serve as a comparison standard for assessing the degree of contamination of surface horizons.

Ключевые слова: городские почвы, Литориновая терраса, почвенные артефакты, тяжелые металлы, антропогенная трансформация почв

Keywords: urban soils, the Littorina terrace, soil artefacts, heavy metals, anthropogenic soil transformation

Введение

Урбанизация в современном мире постоянно прогрессирует, приводя к неуклонному возрастанию доли городского населения в развитых странах, не исключая Россию, где эта доля превышает 70%. В условиях урбанизации происходит трансформация всех компонентов природного ландшафта, включая его основу — почвы и грунты. Антропогенный фактор почвообразования в городской среде становится доминирующим [12, 27, 36, 42, 43]. Важнейшей причиной трансформации почв и грунтов является поступление в них антропогенного материала (арте-

факты, техногенная пыль и т. д.), а также создание насыпных слоев, которые становятся субстратом почвообразования для городских почв [27]. Насыпные слои могут быть представлены строительным мусором, городскими отходами, золой, шлаком, или представлять собой намывной материал [22]. В американской классификации почв такие субстраты рассматриваются как измененные или транспортированные человеком (human-altered и human-transported materials), а сформированные на них почвы — как human-altered и human-transported soils (НАНТ) [29, 32]. Археологи и специалисты в области археологиче-

ского почвоведения и палеопочвоведения называют антропогенный нанос на поверхности природных почв или грунтов культурным слоем [41]. А. В. Долгих и А. Л. Александровский для обозначения мощных культурных слоев городов с рассеянными признаками педогенеза и слабо развитыми почвами предложили термин «городские педоседименты» [3]. Культурный слой состоит из заполнителя (мелкоземистого материала) и артефактов. Заполнитель является сложным природно-антропогенным образованием, формирующимся под действием почвенных и седиментационных процессов [16]. Наряду с техногенными компонентами, такими как пыль и мелкодисперсная составляющая строительного мусора, значительный вклад в формирование заполнителя культурного слоя вносят перемещенные и перемешанные с антропогенным материалом фрагменты исходных почв и грунтов. По этой причине во многих публикациях [23, 28, 31, 49] данные о природных факторах (геологическое строение, породы, рельеф) используются для выявления закономерностей формирования и функционирования городских почв.

Техногенные субстраты могут способствовать развитию в городских почвах процессов, не свойственных исходным почвам изучаемой территории [32]. При этом для заметного проявления этих процессов требуется определенное время: так, исследователями из Бельгии [25] показано, что признаки выщелачивания, элювиирования или иллювиирования проявляются только в тех насыпных горизонтах городских почв, с момента формирования которых прошло не менее 100 лет. В связи с этим, свойства городских почв сильно зависят от характеристик насыпного материала и, в частности, от природы включенных в него артефактов.

Общепризнанной является высокая гетерогенность строения и свойств городских почв [12, 21, 25, 27, 31, 36] как в вертикальном направлении, так и по площади. В терминологии Н. П. Солнцевой с соавторами [15], можно говорить о наблюдаемой в таких почвах полной разупорядоченности природной матрицы (исходного генетического профиля), а также сочетании в них литогенных и остаточно-почвенных элементов и признаков. Для городских почв литогенная составляющая также характеризуется сложностью и неоднородностью, поскольку является результатом соединения природных и техногенных компонентов.

Благодаря близости свойств техногенных материалов (кирпич, цемент, шлаки и т. д.), независимо от региона их производства, городские почвы приобретают ряд общих свойств, наблюдаемых в крупных городах разных регионов и даже континентов [34]: повышенная плотность сложения, преимущественно

щелочная реакция, повышенное содержание фосфора, а нередко и углерода, высокое содержание загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов (ТМ). *Pb, Cu, Zn* являются теми металлами, повышенное содержание которых наблюдается в почвах большинства городов мира [7, 24]. Их было даже предложено называть «городскими металлами», поскольку их аккумуляция в поверхностных горизонтах почв обусловлена разнообразными антропогенными источниками [26]. В работах многих исследователей [30, 37] показано, что на степень загрязнения городских почв ТМ влияют уровень развития промышленного производства в городе, а также длительность воздействия источников загрязнения на почвы.

В свете вышеизложенного нами была поставлена цель — изучить городские почвы центральной части Санкт-Петербурга, подстилающими породами и основой мелкоземистого заполнителя культурного слоя которых послужили литориновые отложения. В рамках данной работы рассматриваются морфологические характеристики почв, гранулометрический состав, основные химические характеристики и содержание наиболее распространенных ТМ — *Pb, Cu, Zn*.

Краткая характеристика исследуемой территории

Санкт-Петербург располагается на 59°57' с. ш. и 30°19' в. д., на побережье Финского залива, площадь города достигает 1400 км², при этом собственно городская территория занимает около половины. Город расположен в южной подзоне тайги, климат умеренный, переходный от умеренно-континентального к умеренно-морскому. Санкт-Петербург располагается на северо-западной окраине сложной древними осадочными породами Русской плиты Восточно-Европейской платформы. Основная часть города находится в пределах Приневской низменности — террасированной озерно-ледниковой равнины, формирование которой происходило под влиянием поздне- и послеледниковых водоемов. Самая нижняя ступень Приневской низменности — Литориновая терраса, с высотными отметками в пределах нескольких метров над уровнем моря. Терраса в центральной части города имеет ширину около 5 км и более, а по северному и южному берегам залива (Петродворцовый и Курортный районы) терраса сужается до 1 км и менее. Свое название терраса получила по наименованию Литоринового моря, одной из стадий развития Балтийского моря в голоцене, существовавшего в период около 8,5–4,5 тыс. лет назад [20]. Литологический состав литориновых отложений — пески, супеси и суглинки серого и голубовато-серого цвета с прослоями хорошо раз-

ложившегося торфа. В суглинках, в свою очередь, отмечается слоистость, прослои и линзы пылеватых песков. Пески относятся в основном к тонкозернистым с высоким содержанием фракции крупной пыли, в пылеватых песках крупные фракции (>1 мм) отсутствуют, в мелких песках их доля в среднем составляет 1–2%. В минералогическом составе доминируют кварц и полевые шпаты [8].

Объекты и методы полевых исследований

Диагностика почв проводилась согласно Классификации почв России 2004 года [4] с учетом новейших разработок в области классификации городских почв России [11], а также некоторыми нашими дополнениями. Городские почвы были отнесены к выделяемому в Синлитогенном стволе типу урбостратоземы. Урбостратоземы — почвы, профиль которых состоит из серии насыпных органоминеральных горизонтов. Диагностическим для урбостратоземов является поверхностный горизонт урбик (UR) со значительным содержанием строительного и бытового мусора (более 10%). Горизонт урбик имеет признаки слоистого сложения/опесчаненности/гравелистости. Для него типична нейтральная или щелочная реакция среды. Мощность горизонта урбик больше 5 см, если он подстилается срезанными природными субстра-

тами или техногенными отложениями, и не менее 40 см, если он залегает на естественных почвенных горизонтах. Подтип урбостратоземы серогумусированные выделяется в случае, если поверхностный горизонт имеет признаки природного серогумусового горизонта. Почвообразующей породой для урбостратоземов является культурный слой, подстилается профиль урбостратоземов либо природной почвообразующей породой, либо погребенной естественной почвой, либо техногенными грунтами. В последнем случае выделяются урбостратоземы техногенные. Техногенный горизонт (ТСН) — это техногенные отложения, насыпной субстрат, созданный или модифицированный деятельностью человека, обладающий повышенной плотностью и твердостью и содержащий антропогенные включения.

Для решения поставленных в исследовании задач, на основании анализа почвенной карты Санкт-Петербурга [1] и материалов собственных исследований [5, 38–40], в пределах Литориновой террасы были выбраны 7 опорных разрезов, расположенных в разных ее частях (рис. 1). Почвенные разрезы были заложены в полевые сезоны разных лет. В некоторых из них удалось обнаружить исходные дерново-глеевые почвы, находящиеся сейчас в погребенном состоянии. В данном описании почвенные разрезы расположены по принципу удаления от центральной части города:

Разрез 1 — Урбостратозем техногенный, подстилаемый литориновыми супесями. Разрез приурочен к археологическому раскопу на территории Петропавловской крепости (Заячий остров), заложеному в 1–2 м от входа в Комендантский дом, в 1 м от его стены, на газоне. Крепость была заложена Петром Великим в 1703 г. и строилась с 1706 по 1740 гг. Комендантский дом — здание в стиле барокко, возведенное между 1743 и 1746 гг. В 2003 г. фасады Комендантского дома были отреставрированы и был возведен атриум. Реставрация определенно повлияла на строение и химический состав прилегающих почв.

Разрез 2 — Урбостратозем, подстилаемый литориновыми супесями. Разрез заложен в Ботаническом саду им. Петра Великого (Аптекарьский остров), в 2 м к востоку от Оранжереи, на территории отдела карантинных растений. Оранжереи были построены в 1823–1824 гг. В период блокады Ленинграда (1941–1944 гг.), 50 зажигательных бомб и 85 снарядов поразили здания оранжерей, обломки стекла и кирпича попали в почвы.

Разрез 3 — Урбостратозем техногенный на погребенной дерново-перегнойно-глеевой почве на литориновых супесях и разрез 4 — Урбостратозем супесчаный, подстилаемый литориновыми супесями, приурочены к археологическим раскопам

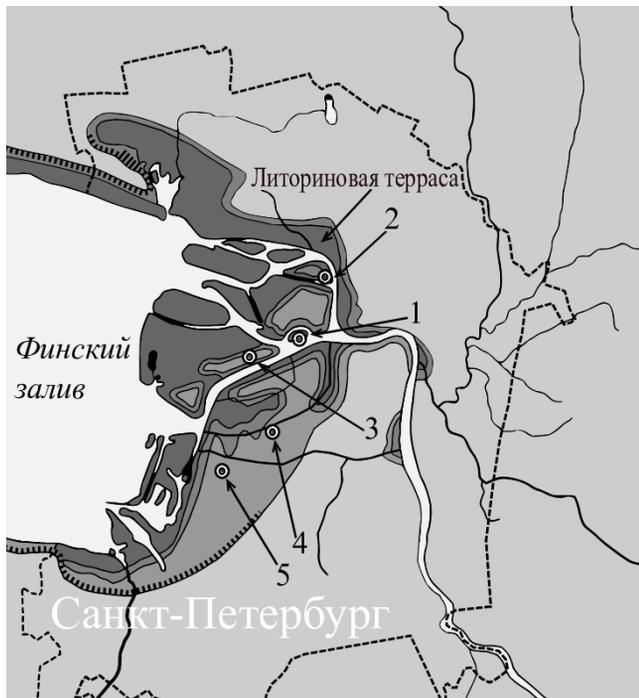


Рис. 1. Литориновая терраса. Цифрами на карте-схеме обозначены места заложения разрезов: 1 — Петропавловская крепость, 2 — Ботанический сад им. Петра Великого, 3 — Румянцевский сквер (заложено 2 разреза), 4 — парк усадьбы Г. Р. Державина (наб. Фонтанки, 118) (заложено 2 разреза), 5 — сквер у здания администрации Кировского района (пр. Стачек, 18)

в Румянцевском сквере (Васильевский остров). Площадь сквера 1,35 га. В начале XVIII в. этот участок занимал Меншиковский рынок, позднее его сменила строительная площадка по возведению расположенного рядом здания Академии Художеств. В конце XVIII в. на территории будущего сквера разместился парадный плац находящегося по соседству Первого кадетского корпуса. Сквер (городской сад) был создан только в 1867 г. В 1927 г. планировку сквера изменили, сократив количество дорожек и изменив размещение насаждений на главной аллее (<https://www.citywalls.ru/house22567.html>).

Разрез 5 — Урбостратозем супесчаный на погребенной дерново-глеевой почве, подстилаемой литориновыми супесями и разрез 6 — Урбостратозем супесчаный на погребенной дерново-глеевой почве, подстилаемой литориновыми супесями, были заложены в саду усадьбы Г. Р. Державина (наб. Фонтанки, 118) в период реставрации сада. Сад создавался на рубеже XVIII и XIX вв. как часть усадьбы известного поэта и государственного деятеля. Современная площадь сада 2,63 га. Две трети территории изначально занимал огород, центром декоративной части служил газон, по периферии сада была проложена гидросеть (пруды и ручей). В середине XIX вв. сад перешел в собственность Римской католической церкви, и его композиция была обновлена. С 1917 г. сад стал общественным местом отдыха и постепенно деградировал вплоть до реконструкции, проведенной в 2007–2011 гг.

Разрез 7 — Урбостратозем серогумусированный супесчаный описан в сквере у здания администрации Кировского района. Сквер расположен на пр. Стачек, 18, в одном из наиболее промышленно развитых районов Санкт-Петербурга. До создания сквера и прилегающего к нему парка им. 9 Января на этом месте располагались постройки деревни Тентелевой и бараки для рабочих химического завода, которые сохранились до середины 1930-х гг.

Методы лабораторных исследований

Гранулометрический состав почв определялся пипет-методом в модификации Почвенного института им. В. В. Докучаева [13]. Химические характеристики почв были определены общепринятыми методами: измерение рН проводилось в водной, для природной почвы — в водной и солевой суспензии, при соотношении почва : раствор = 1:2,5, потенциометрическим методом (рН-метр «Мультитест»), определение содержания углерода органических соединений — методом Тюрина с титриметрическим окончанием, содержание карбонатов — гравиметрическим методом, содержание обменных катионов в природной почве — комплексонометрическим методом после вытеснения NaCl, величина гидролитической кислотности в природной почве — по Каппену-Гильковицу [17], содержание подвижного фосфора — в разрезах 1–4 — в вытяжке Олсена, в разрезах 5–7 — в вытяжке Мачигина [10]. Определение содержания тяжелых металлов проводилось с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии в химической лаборатории «ООО ТСК» после разложения почвы смесью кислот.

Результаты и их обсуждение

Результаты и их обсуждение

Строение изученных городских почв (рис. 2 а-ж) характерно для почв центральной части крупных городов, где в каждом профиле чередуются слои, состоящие из разнородных материалов, морфологическое строение и состав которых определяются главным образом историей землепользования на конкретном участке [12, 21]. Во всех изученных почвах мощность антропогенной толщи, где ее удалось определить, составила около 120–180 см. В некоторых почвах (разрезы 2, 3, 7) встречаются техногенные слои, состоящие преимущественно из обломков кирпича, в почвах разрезов 2 и 7, сформировавшихся, предположительно, в период Великой Отечественной войны, а в разрезе 3 — ранее, в ходе изменений планировки сквера. В целом почвы характеризовались супесчаным гранулометрическим составом, что дает основание предполагать, что при подсыпке слоев использовался местный материал — супеси литориновой террасы. Содержание крупнозема (частиц размером более 1 мм) сильно варьирует по профилю, однако максимальные его количества были приурочены к горизонтам ТСН (до 50% от массы горизонта), а в погребенных природных почвах он отсутствовал.

Химические характеристики изученных почв (табл. 1) являются типичными для городских почв [11, 34]. Им свойственно преобладание щелочной реакции, которая в нижних горизонтах сменяется близкой к нейтральной. Характерно присутствие во многих горизонтах карбонатов техногенного происхождения (остатки строительного раствора, известь). Содержание углерода органических соединений варьирует по профилю, при этом выделяются относительно повышенные значения в современных поверхностных горизонтах, в гумусовых горизонтах погребенных почв (разрез 3) и в некоторых горизонтах UR, относительно обогащенных органическим веществом, что может быть связано как с характером насыпного субстрата, так и с длительностью функционирования этого горизонта как поверхностного на предыдущих этапах формирования почвы [19].

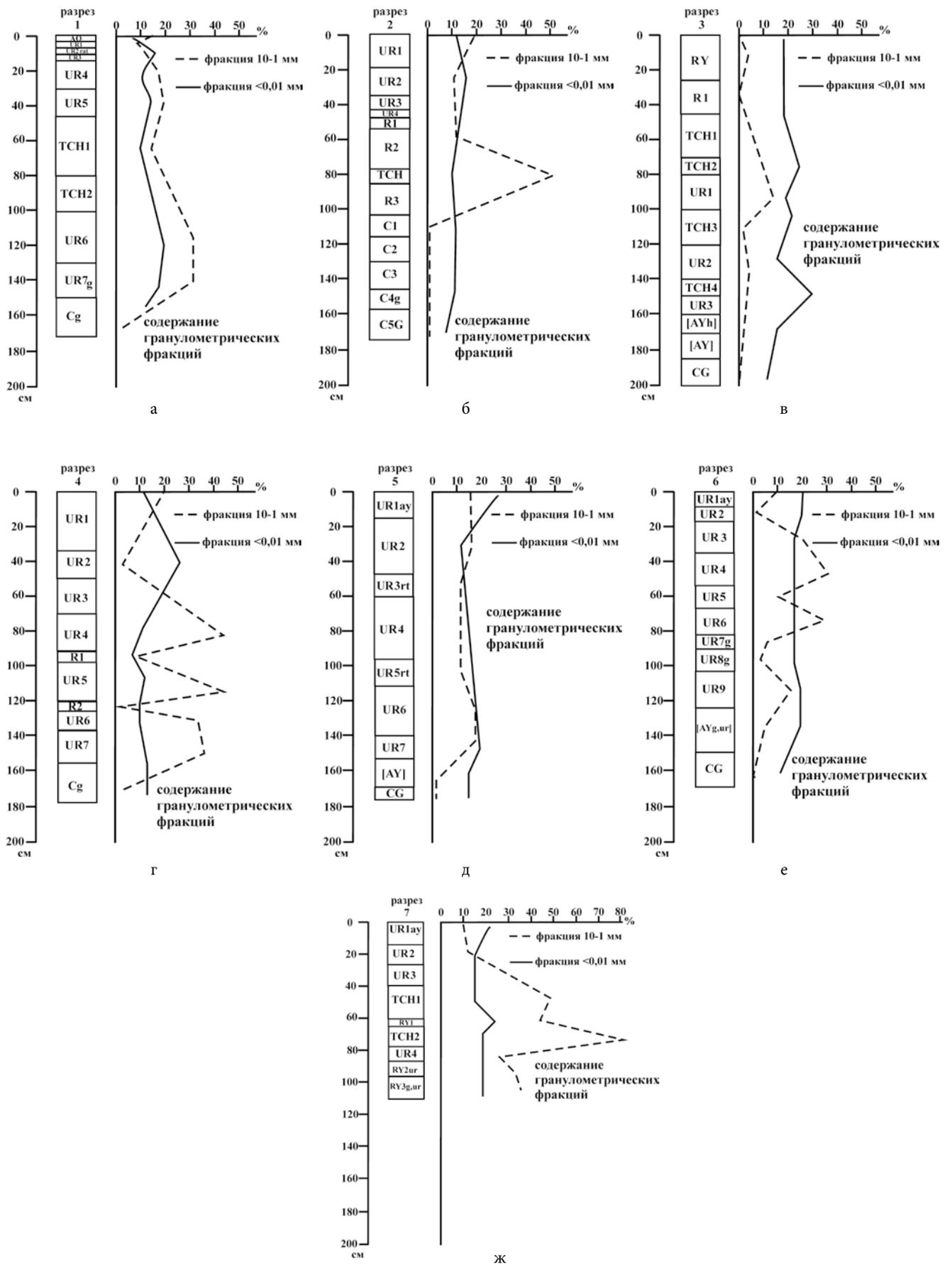


Рис. 2 (а-ж). Строение почвенных разрезов. Содержание фракций крупнозема и физической глины в почвенных разрезах

Таблица 1. Химические характеристики городских почв Санкт-Петербурга

Горизонт	Глубина, см	pH_{H_2O}	$C_{орг}$, %	$CaCO_3$, %	P подв.	Cu	Pb	Zn
					мг/кг			
Разрез 1 — Урбостратозем техногенный, подстилаемый литориновыми супесями (Петропавловская крепость)								
UR1	0–3	7,41	3,12	2,20	30,0	55	121	1360
UR1	3–6	6,64	0,21	н/о	5,5	11	9	555
UR2rat	6–9	6,51	8,08	н/о	20,0	272	256	4343
UR3	9–13	7,01	1,52	н/о	18,0	92	127	4300
UR4	13–31	8,11	0,78	2,77	23,6	30	546	1400
UR5	31–46	8,10	1,43	4,12	66,2	н/о	н/о	н/о
TCH1	46–80	8,11	1,22	4,61	99,2	н/о	н/о	н/о
UR6	80–134	7,82	2,12	1,50	37,3	40	62	50
UR7g	134–150	7,12	2,52	н/о	66,7	15	45	27
Cg	150–170	6,51	0,91	н/о	60,7	7	10	20
Разрез 2 — Урбостратозем, подстилаемый литориновыми супесями (Ботанический сад)								
UR1	0–19	7,70	1,03	26,29	32,0	16	106	72
UR2	19–36	7,85	0,98	2,16	38,7	16	198	65
UR3	36–42	7,87	0,98	1,82	37,0	15	125	68
UR4	42–52	7,50	1,94	1,24	36,0	28	149	243
R1	52–54	7,62	0,33	1,16	26,6	н/о	н/о	н/о
R2	54–79	7,56	1,26	1,41	50,7	16	63	50
TCH	75–84	8,58	0,32	5,57	34,7	н/о	н/о	н/о
R3	84–102	7,15	0,15	н/о	24,0	3	6	16
C1	102–117	7,06	0,00	н/о	21,3	3	3	15
C2	117–130	6,92	0,05	н/о	21,3	6	2	36
C3	130–145	6,90	0,01	н/о	20,0	н/о	н/о	н/о
C4g	145–158	6,88	0,02	н/о	17,3	н/о	н/о	н/о
C5G	158–175	6,72	0,00	н/о	8,0	н/о	н/о	н/о
Разрез 3 — Урбостратозем техногенный на погребенной дерново-перегнойно-глеевой почве на литориновых супесях (Румянцевский сквер)								
RY	0–25	7,35	3,20	2,34	26,6	87	175	272
R1	25–41	8,76	0,72	8,72	32,0	46	58	34
TCH2	70–80	8,50	0,55	3,72	40,0	18	57	44
UR1	90–100	8,17	1,00	10,26	122,7	36	154	209
TCH3	100–120	8,33	0,50	24,49	88,0	29	302	118
UR2	120–140	8,20	1,16	7,16	64,0	25	183	27
UR3	150–160	8,30	0,37	1,56	21,3	16	70	43
[AYh]	160–170	7,05	4,64	н/о	18,7	18	79	39
[AY]	170–175	6,90	1,63	н/о	21,3	11	25	15
CG	185–200	7,28	0,09	н/о	16,0	2	3	10
Разрез 4 — Урбостратозем супесчаный, подстилаемый литориновыми супесями (Румянцевский сквер)								
UR1	0–36	8,16	1,42	3,32	37,3	43	282	205
UR2	51–67	8,10	1,72	2,23	21,3	15	136	37
UR3	67–95	8,53	0,73	6,17	32,0	28	91	42
UR4	95–98	8,34	0,31	1,42	24,0	9	23	22
UR5	98–120	8,12	1,91	2,92	53,3	52	265	247
R2	120–126	8,01	0,27	1,72	32,0	5,7	86	23
UR6	132–137	8,12	1,28	1,66	50,7	16	458	32
UR7	137–157	8,23	1,18	1,74	45,3	15	606	25
Cg	157–174	8,18	0,15	1,36	42,7	3	8	13

Таблица 1. Окончание.

Горизонт	Глубина, см	pH_{H_2O}	$C_{орг}$, %	$CaCO_3$, %	P подв.	Cu	Pb	Zn
					мг/кг			
Разрез 5 - Урбостратозем супесчаный на погребенной дерново-глеевой почве, подстилаемой литориновыми супесями (сад усадьбы Г. Р. Державина)								
UR1ay	0-15	7,24	5,37	2,9	20,3*	50	150	150
UR2	15-47	7,78	3,17	2,7	12,6*	30	100	120
UR3rt	47-60	7,90	6,92	4,6	16,8*	30	150	80
UR4	60-99	8,15	2,67	2,9	15,6*	25	60	80
UR5rt	99-112	8,26	5,22	4,3	15,1*	25	100	80
UR6	124-140	8,44	4,49	3,3	13,2*	20	50	60
UR7	140-155	8,09	2,86	2,2	н/о	20	20	50
[AY]	155-170	7,68	1,94	1,3	10,5*	50	20	40
CG	171-176	8,24	0,52	1,5	н/о	15	20	30
Разрез 6 — Урбостратозем супесчаный на погребенной дерново-глеевой почве, подстилаемой литориновыми супесями (сад усадьбы Г. Р. Державина)								
UR1ay	0-7	7,08	4,36	2,9	9,4*	40	150	400
UR2	7-17	7,69	2,53	3,2	12,2*	30	150	200
UR3	17-35	8,00	1,69	5,1	10,5*	40	400	600
UR4	35-56	8,22	0,75	3,4	10,0*	25	80	60
UR5	56-64	7,85	1,14	4,9	н/о	н/о	н/о	50
UR6	64-81	8,00	1,81	4,2	н/о	30	150	30
UR7g	81-88	7,85	1,05	3,2	н/о	н/о	н/о	50
UR8g	88-103	7,98	0,64	3,8	н/о	30	60	30
UR9	103-122	8,10	0,88	5,4	н/о	н/о	н/о	50
[AYg,ur]	122-150	6,20	2,44	1,5	7,0*	25	30	30
CG	150-170	7,55	0,07	2,5	н/о	15	18	30
Разрез 7 — Урбостратозем серогумусированный супесчаный (сквер у здания администрации Кировского района)								
UR1ay	0-15	7,4	3,50	2,5	22,0*	92	180	280
UR1	15-25	7,8	2,46	1,3	8,0*	н/о	н/о	н/о
UR2	25-40	7,9	2,68	2,9	17,0*	н/о	н/о	н/о
TCH1	40-60	8,1	1,45	7,0	н/о	н/о	н/о	н/о
RY1	60-63	8,0	2,00	4,6	н/о	н/о	н/о	н/о
TCH2	63-77	7,9	3,42	4,7	н/о	н/о	н/о	н/о
UR4	77-84	7,8	1,90	15,7	н/о	н/о	н/о	н/о
RY2ur	84-94	7,0	1,83	10,8	н/о	н/о	н/о	н/о
RY3g,ur	100-110	7,2	0,84	1,3	н/о	н/о	н/о	н/о

Примечания: н/о — не определено; *выделены значения подвижного фосфора, полученные в вытяжке Мачигина

Сравнение характеристик городских почв с природной почвой литориновой террасы (табл. 2) выявило значительные различия их свойств: так, городские почвы были щелочными, а природная почва оценивалась как слабокислая, на основании определения величины водородного показателя водной суспензии, и среднекислая, в соответствии с результатами определения pH в солевой суспензии (исключение составлял поверхностный горизонт).

Природная почва характеризовалась низкой степенью насыщенности основаниями. В то же время содержание углерода органических соеди-

нений в гумусовом горизонте природной почвы в целом было близко к его содержанию как в погребенных, так и в дневных гумусовых горизонтах городских почв.

В изученных почвах преобладали высокие уровни содержания подвижных соединений фосфора, а концентрации этого элемента, оцениваемые как низкие, встречались крайне редко. При этом нередко наиболее высокие содержания фосфора отмечались не в поверхностных горизонтах, а в средней и нижней части профиля (разрез 1, 3, 4). Такую закономерность можно объяснить антропогенным поступлением соединений фосфора на всех

Таблица 2. Химические характеристики дерново-глеевой среднесуглинистой почвы на литориновых супесях (южное побережье Финского залива, парк Сергиевка)

Горизонт	Глубина, см	pH_{H_2O}	pH_{KCl}	$C_{орг}$, %	H_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	V, %
					смоль(+)/кг почвы			
AУ1	0–6	6,2	5,4	2,18	46,6	6,0	3,0	16
AУ2	6–15	6,0	4,8	1,96	34,3	5,0	4,0	21
Gox	20–30	6,2	4,6	0,53	17,8	1,8	1,5	16
G	60–70	6,3	4,8	0,12	5,1	2,0	2,0	44

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в незагрязненных почвах и почвах разных городов мира

Источник	Cu	Pb	Zn
Пахотные почвы Северо-Запада, поверхностный горизонт, медиана [6]	9	16	48
Лесная почва, дерново-подзол иллювиально-железистый на озерно-ледниковых песках (Ленинградская обл.), гумусовый горизонт [9]	5	9	46
Лесная почва, дерново-элювиально-метаморфическая глееватая на ленточных глинах (Ленинградская обл.), гумусовый горизонт [9]	17	30	85
Почвы мира, среднее [33]	20	25	64
Поверхностный горизонт почв Санкт-Петербурга, медиана [2]	50	60	200
Поверхностный горизонт почв Берлина, медиана [18]	29	55	87
34 европейских города, медиана [35]	46	102	130
21 город Китая, медиана [35]	40	55	109

этапах формирования городской почвы, а также миграцией его соединений из верхних горизонтов в нижние.

Для выявления наличия и степени загрязнения почв ТМ принято сравнивать полученные значения с фоновыми, т. е. аналогичными незагрязненными почвами. Такой подход трудно реализовать для городских антропогенных почв, для которых отсутствуют незагрязненные аналоги, а мелкозем этих почв может иметь различное происхождение [45]. Тем не менее, сравнение между почвами городов мира и незагрязненными почвами северо-запада России (табл. 3) показали превышение концентраций *Pb*, *Cu* и *Zn* в исследованных городских почвах от 2–3 до 30 и более раз.

Особенно высокие концентрации цинка отмечались в почве разреза 1, где аккумуляция этого металла в поверхностных горизонтах могла быть обусловлена недавно проведенной реставрацией, во время которой в почву попали частицы краски и обрезки оцинкованного железа, используемого для кровли. При этом отмечается сходство большинства полученных значений с медианными содержаниями ТМ в почвах крупных городов мира. Между распределением ТМ по профилю почв и другими характеристиками (рН, содержание углерода органических соединений и физической глины) не было выявлено корреляционных взаимосвязей. Наблюдалось сильное варьирование концентраций ТМ по горизонтам профиля, обусловленное, очевидно, историей

землепользования, отраженной в почвенном профиле: наиболее сильное варьирование наблюдалось в почвах Румянцевского сада (разрезы 3 и 4), где эта история была наиболее сложна. Расчет коэффициентов накопления ТМ по отношению к породе (гор. Сg) в разрезе 4 (рис. 3) показал два синхронных пика — в поверхностном горизонте UR1 и в горизонте UR5 (98–120 см), что свидетельствует о полиэлементном загрязнении почвы, которое хорошо согласуется с историей участка, так в горизонтах UR6, UR7 наблюдалось загрязнение преимущественно свинцом, который широко применялся в XVIII в., то есть в то время, когда эти горизонты, вероятно, сформировались, для изготовления красок, труб и оконных переплетов.

Заключение

Преобладающими почвами исторической части Санкт-Петербурга, расположенной в пределах Литориновой террасы, являются урбостратоземы, в профиле которых могут сохраняться исходные природные почвы, перекрытые культурным слоем общей мощностью до 150–190 см. Собственно литориновые отложения вскрываются под насыпной толщей (культурным слоем) даже в тех случаях, когда природные почвы, на них сформированные, не сохранились в результате преобразования или уничтожения человеком. Литориновые отложения сохраняются также в качестве мелкоземистого заполнителя в большинстве насыпных горизонтов,

что отражается как в их морфологии, так и в гранулометрическом составе. В городских почвах нередко наблюдалось значительное количество артефактов, основная масса которых представлена строительным мусором (обломками кирпича, стекла, кусками строительного раствора, шлака и др.). Состав, количество и размеры антропогенных включений зависели от истории землепользования на конкретном участке и варьировали в разных разрезах, заложенных в пределах одного объекта (например, сквера или сада).

Исследованные почвы характеризовались преобладанием щелочной реакции, присутствием карбонатов, повышенным содержанием подвижных

соединений фосфора. Содержание углерода органических соединений варьировало по профилю, при этом максимальное содержание наблюдалось в поверхностном горизонте и в гумусовых горизонтах погребенных природных почв.

Содержание тяжелых металлов в насыпной толще было повышенным, что свидетельствовало об антропогенном загрязнении почв. Концентрации *Cu*, *Pb* и *Zn* изменялись по профилю, при этом природные почвообразующие породы, залегающие под антропогенной толщей, характеризовались минимальным содержанием тяжелых металлов, поэтому могут служить «внутренним фоном» для оценки степени загрязнения поверхностных горизонтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апарин Б. Ф., Сухачева Е. Ю. Принципы создания почвенной карты мегаполиса (на примере Санкт-Петербурга) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 790–802.
2. Голубев А. Д., Сорокин Н. Д. (ред.). Экологическая обстановка в Санкт-Петербурге: аналитический обзор экологической обстановки в Санкт-Петербурге за 25 лет. Санкт-Петербург: ФормаТ, 2004. 784 с.
3. Долгих А. В., Александровский А. Л. Почвы и культурный слой Великого Новгорода // Почвоведение. 2010. № 5. С. 515–526.
4. 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.
5. Матинян Н. Н., Бахматова К. А., Коренцвит В. А. Почвы Летнего сада (Санкт-Петербург) // Почвоведение. 2017. № 6. С. 643–651.
6. Матинян Н. Н., Рейманн К., Бахматова К. А., Русаков А. В. Фоновое содержание тяжелых металлов и мышьяка в пахотных почвах Северо-Запада России (по материалам Международного геохимического атласа) // Вестник СПбГУ, сер.3. Вып.3. 2007. С. 123–134.
7. Никифорова Е. М., Кошелева Н. Е. Многолетняя динамика загрязнения тяжелыми металлами почв Восточного округа Москвы // Геохимия ландшафтов и география почв. Под ред. Н. С. Касимов и М. И. Герасимовой. М.: АПР, 2012. С. 186–206.
8. Норова Л. П., Николаева Л. П. Изменчивость физико-механических свойств комплекса морских и озерных голоценовых отложений в разрезе Санкт-Петербурга // Грунтоведение. 2018. № 1 (10). С. 27–37.
9. Панова Е. Г., Олейникова Г. А., Матинян Н. Н., Бахматова К. А. Химический состав водорастворимой фракции почв на озерно-ледниковых отложениях Русской равнины // Почвоведение, 2016, № 6. С. 679–689.
10. Практикум по агрохимическому анализу почв: Учебное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2005. 88 с.
11. Прокофьева Т. В., Герасимова М. И., Безуглова О. С., Бахматова К. А., Гольева А. А., Горбов С. Н., Жарикова Е. А., Матинян Н. Н., Наквасина Е. Н., Сивцева Н. И. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // Почвоведение. 2014, № 10. С. 1155–1164.
12. Прокофьева Т. В., Иванников Ф. А., Розанова М. С., Рахлеева А. А. Формирование почв в урбанизированной среде: условия и результаты трансформации почвоподобных техногенных образований (на примере г. Москвы) // Функционирование почв в меняющихся условиях окружающей среды. Отв. Ред.: Терехова В. А., Шоба С. А. М.: ГЕОС, 2015. С. 86–105.
13. Растворова О. Г. Физика почв (практическое руководство). Л.: Изд-во Ленингр. Ун-та, 1983. 196 с.
14. Семенюк О. В., Силева Т. М., Пеленева М. В. 2011. Минеральная основа антропогенных почв объектов ландшафтной архитектуры // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. № 4. С. 17–21.
15. Солнцева Н. П., Герасимова М. И., Рубилина Н. Е. Морфогенетический анализ техногенно-преобразованных почв // Почвоведение. 1990. № 8. С. 124–129.
16. Сычева С. А. Культурный слой как объект гео-

- графии // Известия РАН. Сер. геогр. 1999. № 6. С. 13–21.
17. Химический анализ почв: Учебное пособие / Растворова О. Г., Андреев Д. П., Гагарина Э. И., Касаткина Г. А., Федорова Н. Н. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 1995. 264 с.
 18. Abel S., Nehls T., Mekiffer B., Wessolek G. Heavy metals and benzo[a]pyrene in soils from construction and demolition rubble // *J. of Soils and Sediments*. 2015, 15. P. 1771–1780.
 19. Amossé J., Le Bayon R.-C., Gobat J.-M. Are urban soils similar to natural soils of river valleys? // *J. of Soils and Sediments*. 2014, 15 (8) DOI: 10.1007/s11368-014-0973-6.
 20. Andrén T., Björck S., Andrén E. et al. The development of the Baltic Sea Basin during the last 130 ka // *The Baltic Sea Basin / Harff J., Björck S., Hoth P. (eds.)*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. P. 75–97.
 21. Burghardt W., Morel J. L., Zhang G. L. Development of the soil research about urban, industrial, traffic, mining and military areas (SUITMA) // *Soil Science and Plant Nutrition*. 2015, 61. P. 3–21.
 22. Burt R., Hernandez L., Shaw R., Tunstead R., Ferguson R., Peaslee S. Trace element concentration and speciation in selected urban soils in New York City // *Environ. Monitoring and Assessment*. 2014, 186. P. 195–215.
 23. Canedoli C., Ferré C., El Khair D. A., Padoa-Schioppa E., Comolli R. Soil organic carbon stock in different urban land uses: high stock evidence in urban parks // *Urban Ecosystems*. 2020, 23. P. 159–171.
 24. Cannon W. F., Horton J. D. Soil geochemical signature of urbanization and industrialization — Chicago, Illinois, USA // *Applied Geochemistry*. 2009, 24. P. 1590–1601.
 25. Delbeque N., Dondeyne S., Gelaude F., Mouazen A. M., Vermeir P., Verdoodt A. Urban soil properties distinguished by parent material, land use, time since urbanization, and pre-urban geomorphology // *Geoderma*. 2022, 413, 115719.
 26. De Miguel E., Llamas J. F., Chacón E., Berg T., Larsen S., Røyset O., Vadset M. Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: unleaded petrol and urban lead // *Atmospheric Environment*. 1997, 31. P. 2733–2740.
 27. Effland W. R., Pouyat R. V. The genesis, classification, and mapping of soils in urban areas // *Urban Ecosystems*. 1997, 1, pp. 217–228
 28. El Khalil H. E., Schwartz C., Hamiani O. E., Kubiniok J., Morel J. L., Boularbah A. Distribution of major elements and trace metals as indicators of technosolisation of urban and suburban soils // *J. of Soils and Sediments*. 2013, 13. P. 519–530.
 29. Galbrait J. M. Human-altered and human-transported (HAHT) soils in the U. S. soil classification system // *Soil Science and Plant Nutrition*. 2018, 64(2). P. 190–199.
 30. Gąsiorek M., Kowalska J., Mazurek R., Pająk M. Comprehensive assessment of heavy metal pollution in topsoil of historical urban park on an example of the Planty Park in Krakow (Poland) // *Chemosphere*. 2017, 179. P. 148–158/
 31. Greinert A. The heterogeneity of urban soils in the light of their properties // *J. of Soils and Sediments*. 2015, 15. P. 1725–1737.
 32. Howard J. Anthropogenic Soils. Series: Progress in Soil Science. Springer Int Publ., 2017. 237 p.
 33. Kabata-Pendias A., Mukherjee A. B. Trace Elements from Soil to Human. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 561 p.
 34. Lehmann A., Stahr K. Nature and significance of anthropogenic urban soils // *J. of Soils and Sediments*. 2007, 7(4). P. 247–260.
 35. Luo X., Yu S., Zhu Y., Li X. Trace metal contamination in urban soils of China // *Sc. of the Total Environment*. 2012, 421–422. P. 17–30.
 36. Makki M., Thestorff K., Hilbert S., Thelemann M., Makowsky L. Guideline for the description of soils in the Berlin metropolitan area: an extension for surveying and mapping anthropogenic and natural soils in urban environments within the German soil classification system // *J. of Soils and Sediments*. 2021, 21. P. 1998–2012.
 37. Mao Q., Huang G., Buyantuev A., Wu J., Luo S., Ma K. Spatial heterogeneity of urban soils: the case of the Beijing metropolitan region, China // *Ecological Processes*. 2014, 3: 23.
 38. Matinian N. N., Bakhmatova K. A. Urban soils of Saint Petersburg (Russia). Europäische Akademie der Naturwissenschaften, Hannover, 2016. 28 p.
 39. Matinian N. N., Bakhmatova K. A., Sheshukova A. A. Anthropogenic and natural soils of urban and suburban parks of Saint Petersburg, Russia. // *Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Function and Ecosystem Services*. Conference proceedings, SUITMA 2017. Eds.: V. I. Vasenev, E. Dovletyarova, Z. Cheng et al. Book series Springer Geography. Springer Int. Publ., 2019. P. 212–220
 40. Matinian N. N., Bakhmatova K. A., Sheshukova A. A. Urban Soils in the Historic Centre of Saint Petersburg (Russia). // *Advances in Understanding Soil Degradation*. Eds.: Saljnikov, E., Mueller, L., Lavrishchev, A., Eulenstein, F. Springer Nature, 2021. P. 755–774.
 41. Mazurek R., Kowalska J., Gąsiorek M., Setlak M. Micromorphological and physico-chemical analyses of cultural layers in the urban soil of a medieval

- city — A case study from Krakow, Poland // *Catena*. 2016, 141. P. 73–84.
42. Pavao-Zuckerman M. A. Urbanization, soils and ecosystem services. // In: *Soil Ecology and Ecosystem Services*. First ed. Ed. By D. H. Wall et al. Oxford University Press, 2012.
43. Pickett S. T.A., Cadenasso M. L. Altered resources, disturbance, and heterogeneity: A framework for comparing urban and non-urban soils // *Urban Ecosystems*. 2009, 12, pp. 23–44.
44. Puskás L., Farsang A. Diagnostic indicators for characterizing urban soils of Szeged, Hungary // *Geoderma*. 2008, 148. P. 267–281.
45. Wong C. S.C., Xiangdong I., Thornton I. Urban environmental geochemistry of trace metals // *Environmental Pollution*. 2006, 142. P. 1–16.

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-2-19-51-57>
УДК 624.131

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗЖИЖАЕМОСТИ ГРУНТОВ ЮЖНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

SEISMIC LIQUEFACTION ASSESSMENT OF SOILS IN THE SOUTHERN PART OF THE BARENTS SEA

С. Г. Миронюк¹, В. Ю. Ионов²
Sergey G. Mironyuk¹, Vsevolod Yu. Ionov²

¹ Геологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119234, Россия

¹ Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119234, Russia

² ПАО «НОВАТЭК», ул. Удальцова, д. 2, Москва, 119415, Россия

² «NOVATEK» PJSC, Udaltsova St., 2, Moscow, 119415, Russia

mironyuksg@gmail.com¹, sevaionov@gmail.com²

Аннотация. В статье анализируются результаты оценки сейсмической разжижаемости грунтов, распространенных в южной части Баренцева моря. Исследования склонности донных грунтов к разжижению были выполнены в рамках инженерно-геологических изысканий для строительства объектов обустройства Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ). Приведен обзор аналогичных исследований, выполненных в сейсмоопасных районах Черного, Азовского, Охотского морей. Отмечается, что образование сейсмодеформаций, обусловленных разжижением грунтов, представляет большую опасность для нефтегазопромысловых сооружений как на суше, так и в море. Определение динамической устойчивости грунтов юга Баренцева моря выполнялось по результатам статического зондирования и расчета сейсмического потенциала разжижения. Показано, что по данным зондирования изученные песчаные грунты оснований проектируемых сооружений ШГКМ не склонны к разжижению при сейсмических нагрузках, характерных для южной части Баренцева моря. В то же время полученные значения сейсмического потенциала разжижения свидетельствуют о возможности перехода песчаных грунтов береговой зоны в текучее состояние при землетрясении с интенсивностью 7,7 баллов. Рекомендовано выполнить прогноз опасности разжижения этих грунтов путем лабораторного определения их динамических свойств.

Abstract. The article presents analysis of results of seismic liquefaction assessment of soils distributed in the southern part of the Barents Sea. Studies of the tendency of seabed soils to liquefaction were carried out as part of the engineering-geological surveys for the construction of production facilities of the Shtokman gas-condensate field (ShGKF). A review of similar studies carried out in seismically hazardous areas of the Black Sea, the Sea of Azov and the Sea of Okhotsk is given. It is noted that formation of seismic deformations caused by liquefaction of soils is very dangerous for oil and gas production facilities both onshore and offshore. The dynamic stability of soils in the southern area of the Barents Sea was performed based on the results of cone penetration testing and calculation of seismic liquefaction potential. It is shown that the studied clay and sandy soils of the foundations of the ShGKF project facilities, on the basis of cone penetration testing, are not prone to liquefaction under the seismic loads typical for the southern part of the Barents Sea. At the same time values of seismic liquefaction potential indicate the possibility of coastal sandy soils transition to fluid state for earthquakes of 7,7 intensity according to the MSK-64 scale. It is recommended to predict the danger of liquefaction of these soils by dynamic properties laboratory determination.

Ключевые слова: опасность разжижения, Баренцево море, сейсмическое разжижение грунтов, статическое зондирование, сейсмический потенциал разжижения, береговая зона, песчаные грунты

Keywords: liquefaction hazard, Barents Sea, seismic liquefaction of soils, cone penetration testing, seismic liquefaction potential, coastal zone, sandy soils

Введение

Сейсмическое разжижение грунтов может вызывать значительные повреждения зданий и сооружений, возведенных на водонасыщенных дисперсных грунтах, прежде всего в связи быстрыми и, как правило, неравномерными их вертикальными осадками отложений и латеральными деформациями [5, 7]. В морях негативные для сооружений последствия разжижения отложений возможны также при штормовых воздействиях на донные грунты.

Основной опасностью, связанной с разжижением, для сооружений гравитационного типа (платформы, причалы и др.) является вертикальное перемещение поверхности морского дна, а для заглубленных трубопроводов — латеральное растекание осадков и возникновение эффекта положительной плавучести с возможной потерей защитного слоя грунта (размыв). Утрата этого слоя, в свою очередь, повышает вероятность повреждения линейных сооружений ледовыми образованиями в замерзающих морях.

Опыт изучения сейсмической разжижаемости морских грунтов

Большое внимание рассматриваемой проблеме уделялось в институте «ПНИИИС» Госкомархстроя РСФСР в период становления сейсмического микрорайонирования (СМР), в т. ч. на шельфе. В начале 90-х годов прошлого века в указанной организации были проведены исследования по прогнозированию остаточных деформаций в песчаных грунтах. Основные выводы по результатам выполненных исследований сводились к следующему:

1. Наибольшую склонность к разжижению проявляют водонасыщенные пески и супеси, реже суглинки;
2. В большинстве случаев сейсмодеформации в песчаных грунтах начинают проявляться при землетрясениях с интенсивностью (I) 7 баллов;
3. Разжижение в песчаных грунтах, как правило, локализуется в приповерхностных частях грунтовой толщи до глубины 5–10 м;
4. В процессе разжижения происходит оседание поверхности за счет динамического уплотнения рыхлых водонасыщенных отложений. При неравномерном уплотнении в массиве возникают многочисленные вертикальные трещины;
5. В случае даже незначительных уклонов поверхности (3–5°) формируются оползни разжижения, которые могут трансформироваться в обломочные потоки (согласно нашим исследованиям, на шельфе Черного моря [14] оползни разжижения, как следствие сильных ($6,0 < M_w < 8,0$) землетрясе-

ний, могут возникнуть при уклонах шельфа всего 1,5°–2,0°).

Для предотвращения аварий и инцидентов на площадках расположения морских объектов, согласно СП 504.1325800.2021, должны быть получены данные, необходимые для расчетов динамической устойчивости грунтов, в соответствии с ГОСТ Р 56353–2022.

Наш опыт изучения рассматриваемого явления в некоторых районах морей с высокой сейсмичностью (восток Черного, юг Азовского, шельф Охотского морей), показал, что в грунтовых толщах областей, подверженных землетрясениями с $M = 5,5–7,5$ и интенсивностью (I) 8–9 баллов имеются слои глинистых и песчаных грунтов, склонных к разжижению [8,9,12,13]. В основном они представлены песками мелкими и пылеватыми средней плотности (пролив Невельского), песками мелкими рыхлыми, средней плотности, песками пылеватыми средней плотности и песками средней крупности средней плотности (северо-восточный шельф о. Сахалин, Кириновское ГКМ), супесью текучей со степенью плотности $I_d < 0,60$ (прикавказский шельф Черного моря), сапропелевыми осадками Черного моря (Туапсинский прогиб). В Азовском море значительно деформируются при сценарном землетрясении с $M = 7,5$, но не разжижаются (PPR = 0,93–0,95) глины текучепластичные, тяжелые и суглинки мягкопластичные, тяжелые пылеватые.

Наиболее детально проблема разжижаемости грунтов изучена на северо-восточном шельфе о. Сахалин [10,15]. В ходе изысканий для обустройства ряда крупнейших месторождений этого региона с участием компании Fugro (Нидерланды) были получены нижеследующие результаты.

В целом, приповерхностная толща северо-восточного шельфа о. Сахалин сложена грунтами склонными к разжижению. В основном они представлены четвертичными песками пылеватыми, мелкими и средней крупности.

На площади Аркутун-Дагинского месторождения возможность разжижения грунта оценивалась посредством вычислений «коэффициентов циклического сопротивления» (CRR) и «коэффициентов циклического напряжения» (CSR) грунтов для землетрясений с $M_w = 7,5$. Выполненные расчёты показали, что грунты обладают высокой степенью сопротивления разжижению, кроме песчаных разновидностей грунтов в осадках палеодолин.

На Лунском месторождении широко распространены мелкие (преобладающая разновидность) и пески средней крупности, залегающие на породах нутовской свиты. Наибольшую опасность здесь также представляют заполняющие палеодолины

пески, которые разжижаются на глубину до 7,0 м.

В границах месторождения Чайво грунтовая толща мощностью 10,0 м сложена песками мелкими и средней крупности, плотными и очень плотными. Мощность слоя возможного разжижения песков в верхней части разреза менее 1,0 м.

На Кайганско-Васюканском участке вероятное разжижение донных осадков при землетрясениях не представляет опасности, так как полупогруженная плавучая буровая платформа непосредственно с дном не взаимодействует. При разжижении грунтов якоря, удерживающие платформу, лишь погрузятся глубже в грунт, что не представляет опасности. Однако при разжижении грунтов может быть повреждено подводное оборудование устья скважины.

В районе месторождения Одопту (расположено в 9 км от Пильгунской косы, о.Сахалин) также были обнаружены грунты, склонные к разжижению при сейсмических нагрузках. Здесь, во время катастрофического Нефтегорского землетрясения ($M_w = 7,1$), в местах излияния разжиженных обводненных песчано-глинистых масс на Пильгунской косе, образовались многочисленные грифоны (sand boils) диаметром до 25–30 м. Излияния разжиженных грунтов были приурочены также к сейсмогенным трещинам шириной 0,5 м [16]. Несомненно, образование сейсмодеформаций, обусловленных разжижением грунтов, таких как грифоны, крупные трещины также представляют большую опасность для нефтегазопромысловых сооружений как на суше, так и в море.

Изучение разжижаемости грунтов Баренцева моря следует отнести к началу 90-х годов 20 века, что связано с планами освоения углеводородных ресурсов Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ) (рис. 1).

В указанный период времени путем анализа и обобщения литературных и фондовых материалов по геологии, тектоники и сейсмичности Баренцевоморского региона организацией «ИМЦ-стройизыскания» была выполнена предварительная оценка инженерно-сейсмических условий участка строительства ШГКМ, в т. ч. рассмотрены вопросы динамической устойчивости донных грунтов. Был сделан вывод, что при прогнозируемом расчетном сейсмическом воздействии (5–6 баллов по шкале MSK-64) разжижение грунтов, слагающих участок строительства, в интервале глубин 0,0–20,0 м (илы глинистые, глины текучепластичные, твердые) маловероятно.

Позже, на проектном этапе изыскания, после принятого решения об использовании на ШГКМ самоходного ледостойкого технологического судна



Рис. 1. Обзорная схема района работ

(Floating Production Unit) в сочетании с технологией подводной добычи углеводородов проблемой разжижения грунтов занималось ООО «Питер Газ». Необходимо было оценить опасность погружения в грунты, в случае их разжижения, оснований объектов подводного комплекса и трубопровода ШГКМ — губа Опасова (Кольский п-ов).

Методы полевых исследований грунтов

Изучение грунтовых условий района размещения сооружений ПДК и трассы трубопровода включало: инженерно-геологическое бурение, пробоотбор, статическое зондирование, а также лабораторные исследования отложений. Полевые работы выполнялись ОАО «АМИГЭ», ООО «Фугро Инжиниринг», Институтом геоэкологии РАН и другими организациями.

Пробоотбор осуществлялся с помощью прямых точных гравитационных и вибрационных трубок с внутренним диаметром порядка 140 мм, длиной 6,0 м. Статическое зондирование проводилось в соответствии с ГОСТ 19912–2001 и ASTM D5778 в двух модификациях: в скважине и с поверхности морского дна с помощью установки статического зондирования «Sea Scout». СPTU выполнялось

с использованием стандартных конусов (площадь зонда 10 см², угол 60°) или конусов большего диаметра (площадь 15 см²) — для более точного измерения параметров в «слабых» глинистых грунтах. Используемые зонды обеспечивали измерение удельного сопротивления грунта под наконечником (конусом) зонда (q_c), удельного сопротивления грунта на участке боковой поверхности (муфте трения) зонда (f_s) и порового давления (U) (рис. 2).



Рис. 2. Установка статического зондирования «Sea Scout»

Состав и свойства грунтов на участках строительства

Изыскания показали, что на площади ШГКМ в верхней части разреза до глубины 10,0–18,0 м залегают (сверху вниз) илы глинистые и суглинки тяжелые с консистенцией от текучей до тугопластичной, пылеватые с прослоями и линзами песков и супеси.

На трассе трубопровода разрез сложен преимущественно илом глинистым, суглинком текучим с линзами песка мелкого, глиной текучепластичной (рис. 3).

В прибрежной и средней части трассы проектируемого трубопровода, наряду с глинистыми грунтами, в верхней части разреза залегают супеси текучие и песчаные грунты мощностью около 2,0 м (рис. 4).

Ближе к берегу супесь постепенно замещается песками мелкими и средней крупности. На участке берегового примыкания трубопровода преобладают пески средней крупности (ундаэлювий, прибрежный подтип, mv) с включениями детрита раковин моллюсков, гальки (щебня) кристаллических пород (по полевому описанию до 25%) в придонной части разреза (рис. 5). Максимальная вскрытая мощность песков этого генетического типа составляет 3 м.

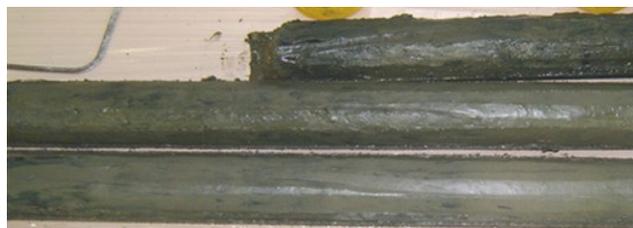


Рис. 3. Характерный вид морских верхнеоплейстоцен-голоценовых отложений. Ил, переходящий в текучий суглинок



Рис. 4. Характерный вид приповерхностного слоя супеси в интервале 0,0–1,50 м



Рис. 5. Характерный вид песчаных грунтов на участке берегового примыкания трубопровода

В береговой зоне губы Опасова локально развиты и флювиогляциальные пески (fg). На ряде участков флювиогляциальные отложения выходят на поверхность морского дна, но обычно перекрыты толщиной морских голоценовых осадков. Мощность слоя песков 0,8–9,0 м. Представлены песками пылеватыми, плотными, с редкими включениями гальки и гравия (до 5%). Гранулометрический состав и свойства изученных песков представлены в таблице 1.

Методы оценки склонности грунтов к разжижению

Оценка параметров, характеризующих возможность разжижения грунтов по результатам статического зондирования выполнена по методу Robertson (NCEER R&W 1998, 2009) [20,21]. Условия и принципы применения данного метода подробно рассмотрены в работах Е. А. Вознесенского [3–5]. Определяемый с помощью указанной методики

Таблица 1. Нормативные значения показателей состава и свойств неоплейстоцен-голоценовых субаквальных песчаных отложений района работ

Разновидности песков	Содержащие частицы, %				Влажность, W, д. е.	Плотность, g/cm^3 , ρ	Коэффициент пористости грунта, e , д. е.	Удельное сцепление, C, кПа	Угол внут. трения, ϕ , град.	Модуль деформации, E, МПа (при интервале давлений, МПа)
	>2	2–0,05	0,05–0,005	< 0,005						
Средней крупности, плотные и средней плотности	6,2	92,7	1,1	0,0	0,17–0,19	1,88–1,99	0,43–0,69	0–1	36–39	25 (0,1–0,4)
Пески пылеватые, плотные	до 5*	88	8,4	3,5	0,19	2,09	0,53	0,0	39	40 (0,2–0,3)

* по полевому описанию

и широко используемый в зарубежной практике, фактор безопасности FS соответствует потенциалу разжижения F_L , используемому для оценки возможности разжижения грунтов, согласно ГОСТ 25100–2011 и ГОСТ 56353–2022. В соответствии с ГОСТ 25100–2011, склонность грунтов к разжижению характеризуются таким образом: разжижаемые, если $F_L \leq 1,15$; неразжижаемые, если $F_L > 1,15$.

Кроме оценки динамической устойчивости донных грунтов, на основании данных статического зондирования предварительная оценка динамической устойчивости грунтового основания морских сооружений может быть выполнена с использованием подхода, разработанного В. В. Штейнбергом [19]. Базовым понятием упомянутого подхода является сейсмический потенциал разжижения (Q). Экспериментально установлено, что возможность разжижения песчаных отложений определяется величиной $Q_{cr} = 1300 \text{ см/с}^2$. При превышении указанного значения $Q > Q_{cr}$ с большой вероятностью возникает разжижение песчаных грунтов. Сейсмический потенциал разжижения связан с максимальным ускорением a_{max} и длительностью колебаний на уровне 0,5 от максимального ускорения ($\tau_{0,5}$) простым соотношением:

$$Q = a_{max} \times \tau_{0,5}.$$

Значения параметров, входящих в указанную формулу, могут быть рассчитаны на основе эмпирических соотношений, приведенных в работах [1, 2], или путем обработки акселерограмм.

В работе [20] рекомендовано использовать иные, более низкие пороговые значения $Q_{cr} = 1100$ и 850 см/с^2 . Отмечается, что величина $Q_{cr} = 1300 \text{ см/с}^2$ — излишне оптимистичная оценка. Данный вывод подкреплен ссылкой на работу [18], в которой указано, что совместное воздействие горизонтальных и вертикальных составляющих сильных движений может значительно снизить порог сейсмических ускорений необходимых для возникновения разжижения. Предложена и обо-

снована более консервативная (пессимистическая) величина критического уровня $Q_{cr} = 850 \text{ см/с}^2$.

Исходными данными для косвенных оценок разжижения грунтов являлись материалы, которые были получены в ходе проведения инженерно-геологических изысканий разных лет на площади ШГКМ и по трассе проектируемого трубопровода. Параметры, необходимые для оценки фактора безопасности (M_{max} , a_{max}), были получены в рамках работ по уточнению исходной сейсмичности (УИС) и СМР. Согласно материалам УИС, сейсмическая интенсивность на площади ШГКМ и вдоль трассы трубопровода определяется исключительно местными землетрясениями. Все остальные активные внешние зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) (Брусиловская, Свальбардская, Новоземельская) не оказывают существенного влияния на сейсмичность площадок строительства ввиду их удаленности. Установлено, что на площади ШГКМ и на большей части трассы трубопровода $M_{max} = 3,5–4,0$; $a_{max} = 0,25–0,70 \text{ м/с}^2$.

Опыт строительства морских трубопроводов свидетельствует, что наиболее сложным для строительства является участки их береговых примыканий [11]. Не является исключением в этом отношении береговое примыкание трубопровода ШГКМ — губа Опасова. К основным особенностям геологического строения указанного участка относится повсеместное распространение скальных пород высокой прочности — гранитов, гранодиоритов, гранито-гнейсов, имеющих неровную кровлю и перекрытых в ряде мест чехлом песков мощностью до 9,0 м (возможен эффект резонансного усиления сейсмических колебаний) [6, 17]. Здесь рассматриваемый трубопровод пересекает активный разлом («сброс Карпинского»). Выделенная по результатам УИС Мурманская зона ВОЗ имеет достаточно высокий сейсмический потенциал ($M_{max} = 5,0 \pm 0,2$). Глубина гипоцентров, ожидаемых мелкофокусных землетрясений $h = 10 \text{ км}$. Согласно данным СМР, расчетная интенсивность

землетрясения здесь может достигать 7,7 баллов для периода повторяемости $T = 5000$ лет ($a_{max} = 1,86 \text{ м/с}^2$).

Первый этап оценки склонности грунтов к разжижению заключался в определении индекса типа грунтов, величина которого характеризует их литологический состав. На втором этапе выполнялся расчёт потенциала разжижения, с помощью которого и оценивалась опасность разжижения грунтов. В ходе обработки измеренных параметров зондирования было выполнено 130 расчётов индекса типа грунта и потенциала разжижения (рис. 6).

Геологический разрез на участках проектируемых объектов ПДК и трассы трубопровода с помощью СРТ и пробоотбора был охарактеризован до глубин порядка 13,0 м, а на трассе трубопровода до 5,0 м. Исследования показали, что повсеместно в качестве грунтового основания для сооружений в разрезе преобладают связные грунты (глинистые, илы). Текучие, текуче- и мягкопластичные глины, суглинки и илы характеризуются низкими значениями скоростей поперечных волн, $V_s = 60\text{--}150 \text{ м/с}$, что косвенно указывает на их склонность к разжижению при сейсмических воздействиях (СП 14.13330.2018, таблица 4.1)

Сложными инженерно-геологическими условиями, как отмечалось выше, характеризуется береговое примыкание трубопровода (губа Опасова). Но и здесь, как показали расчеты, несмотря на наличие песчаных грунтов и повышенную сейсмичность, при сейсмических нагрузках, характерных для Мурманской зоны ВОЗ, разжижение песчаных грунтов по данным СРТ не происходит.

Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы относительно разжижаемости изученных грунтов:

1. Как волновые, так и реликтовые водно-ледниковые песчаные грунты, распространенные в губе Опасова, соответственно средней крупности, плотные и средней плотности и пески пылеватые, плотные при заданном сейсмическом воздействии ($a_{max} = 1,86 \text{ м/с}^2$) в целом можно квалифицировать как неразжижаемые. Однако на участках их повышенной мощности (6–10 м и более [17]) в результате резонансного усиления колебаний возможно проявление их нелинейных свойств. На склонность песчаных грунтов к разжижению косвенно указывает значение сейсмического потенциала разжижения (Q);

2. Учитывая особенности батиметрии участка берегового примыкания трубопровода (мелководье), рекомендуется, в случае возобновления проектно-изыскательских работ по Штокмановскому проекту, выполнить оценку устойчивости песков в условиях волновых (штормовых) нагрузок;

3. Преобладающие в разрезе связные грунты, судя по их скоростным характеристикам, также, возможно, подвержены разжижению при динамических нагрузках. Для точной оценки разжижаемости этих грунтов необходимо провести их лабораторные испытания методом динамического трехосного сжатия.

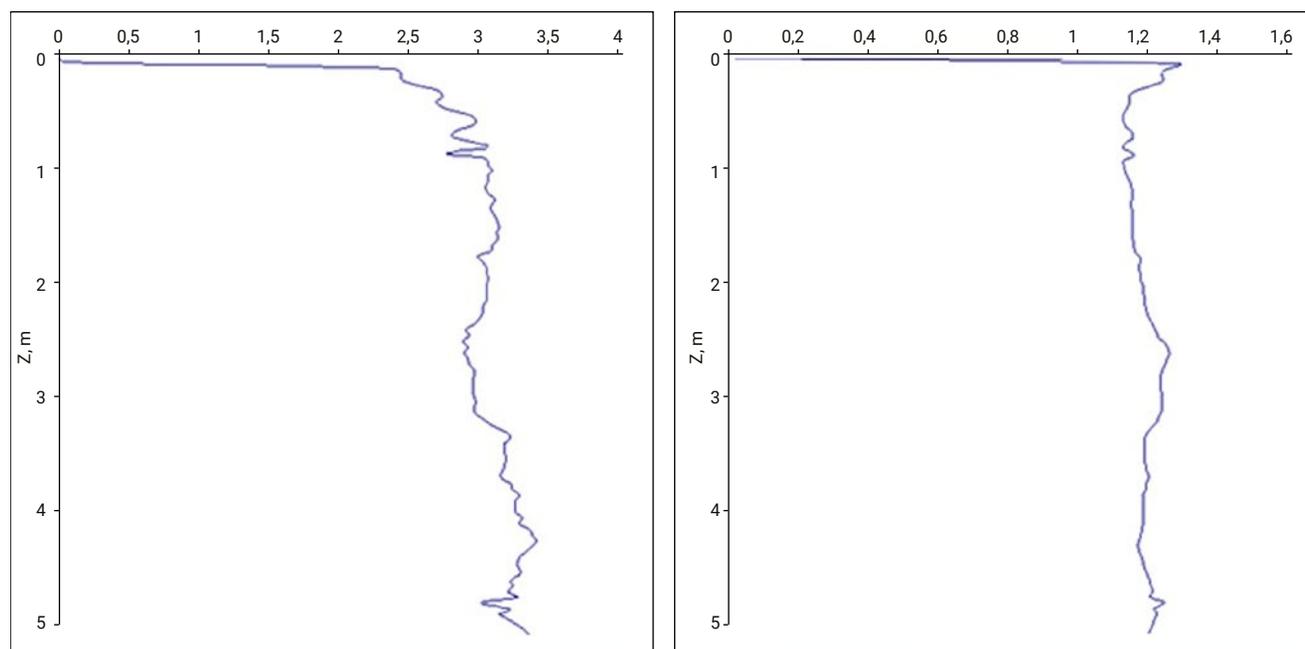


Рис. 6. Типичный пример вариаций индекса типа грунта (I_c) и потенциала разжижения (F_1) в точке зондирования СРТ по трассе трубопровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аптикаев Ф. Ф. Сильные движения грунта при землетрясениях (сейсмические воздействия): дис. док. физ.-мат. наук. М.: ОИФЗ, 2001. 263с.
2. Аптикаев Ф. Ф., Копничев Ю. Ф. Учет механизма очага землетрясения при прогнозе параметров сильных движений // Доклады АН СССР, 1979. Т. 247. С. 822–825.
3. Вознесенский Е. А. Динамические испытания грунтов. Состояние вопроса и стандартизация // Инженерные изыскания, 2013. № 5. С. 20–26.
4. Вознесенский Е. А., Кушнарева Е. С. Сейсмическая разжижаемость грунтов: инженерная оценка и классифицирование // Инженерная геология, 2012. № 2. С. 11–23.
5. Вознесенский Е. А., Коваленко В. Г., Кушнарёва Е. С., Фуникова В. В. Разжижение грунтов при циклических нагрузках. М. : Изд-во МГУ, 2005. 134 с.
6. Лаптева Т. И., Мансуров М. Н., Чумарин Д. Х., Копалева Л. А. Устойчивость морских трубопроводов, находящихся в донных грунтах, подверженных явлению разжижения // Газовая промышленность, 2011. № 13. С. 98–101.
7. Миронюк С. Г. Опыт сейсмического микрорайонирования морского и сухопутных участков трассы газопровода Джубга — Лазаревское — Сочи // ГеоИнжиниринг, 2011. № 3. С. 66–73.
8. Миронюк С. Г., Манжосов С. В., Ионов В. Ю. Оценка разжижаемости грунтов на площадках строительства подводных трубопроводов и добычного комплекса в районах северо-западного и северо-восточного шельфа о. Сахалин // Инженерные изыскания, 2011. № 6. С. 6–14.
9. Миронюк С. Г. Геологические опасности осваиваемых месторождений восточного шельфа о. Сахалин: идентификация и принципы картографирования // Вести газовой науки, 2015. № 2. С. 113–117.
10. Миронюк С. Г. Береговые примыкания морских газопроводов: выбор технологии строительства с учетом оценки геологических опасностей// Тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2015)», Москва, 28–29 октября 2015 года. М. : Газпром ВНИИГАЗ, 2015. С. 31.
11. Миронюк С. Г., Озмидов О. Р. Опыт оценки динамической устойчивости грунтов оснований объектов инфраструктуры морского порта Темрюк // Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций. М.: 2015. С. 166–171.
12. Миронюк С. Г., Озмидов О. Р. Из опыта оценки сейсмической разжижаемости грунтов оснований якорей полупогружных буровых установок с помощью динамических трехосных испытаний // Инженерные изыскания, 2016. № 2. С. 18–23.
13. Миронюк С. Г., Кропоткин М. П. Возможный механизм и причины образования Утришских оползней суши и шельфа (полуостров Абрау) // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов (Опасные явления — II). ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону, 2020. С. 52–57.
14. Новиков А. И., Новиков А. А., Голубин С. И., Савельев К. Н. Особенности проведения инженерных изысканий при определении потенциала разжижения грунтов в основании объектов морской добычи шельфа острова Сахалин (Россия) // Газовая промышленность, 2018. № 3 (765). С. 18–25.
15. Оскорбин Л. С., Поплавский А. А., Стрельцов М. И. и др. Нефтегорское землетрясение 27 (28) мая 1995 года ($M_w=7,1$) // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году, 2001. С. 170–182.
16. Чернов Ю. К., Чернов А. Ю. Сейсмогенное разжижение грунтов (предварительные оценки для некоторых участков территорий Дальнего Востока и Юга России) // Инженерная геология, 2007. № 12. С. 34–44.
17. Штейнберг В. В. Колебания грунта при землетрясениях // Вопросы инженерной сейсмологии, вып.31. М. : Наука, 1990. С. 47–67.
18. Штейнберг В. В., Сакс М. В., Аптикаев Ф. Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Вопросы инженерной сейсмологии, 1993, вып. 34. М.: Наука. С. 5–94.
19. Robertson P. K. Performans Based Earthquake Design Using the CPT. Keynote Lecture., IS-Tokyo, June 2009.
20. Youd, T. L., Idriss, I. M., Robertson, P. K., et al. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, vol, 127, October 2001. P. 817–833.

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-2-19-58-64>
УДК 624.131.7

ПОВЕДЕНИЕ ГРУНТОВ И ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ОПОЛЗНЕВОГО БЛОКА

BEHAVIOR OF SOILS AND DISSIPATIVE GEOLOGICAL STRUCTURES DURING THE FORMATION OF A LANDSLIDE BLOCK

© 2022 г. Г. П. Постоев¹, А. И. Казеев², М. М. Кучуков³
© 2022 German P. Postoev¹, Andrey I. Kazeev², Marat M. Kuchukov³

^{1,2,3} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), Уланский переулок, д. 13, стр. 2 (а/я 145), Москва, 101000, Россия
^{1,2,3} Sergeev Institute of Environmental Geoscience of Russian Academy of Sciences (IEG RAS), Ulansky lane, 13, bld. 2 (POB 145), Moscow, 101000, Russia

opolzen@geoenvironment.ru¹, kazeev@yandex.ru²

Аннотация: При развитии оползневой процесс нередко в качестве основных факторов, определяющих возникновение оползня или его активизацию, выделяют особенности состояния и прочности грунтов, их проявления как «слабого» слоя в массиве, а также изменение свойств грунтов под воздействием природных и техногенных факторов. Эти представления распространяют как на покровные неглубокие оползни типов сдвига-скольжения и разжижения-течения, так и на глубокие блоковые оползни типа сжатия-выдавливания с выделением в последних грунтов так называемого «основного деформирующегося горизонта». Образование нового оползневой блока сопровождается проявлением разрушительных смещений на оползневой участке, захватывающем весь склон. Такие события нередки на урбанизированных территориях, на склонах с развитием глубоких оползней сжатия-выдавливания. В данной статье рассматривается механизм образования оползневой блока и геологические закономерности преобразования напряжённо-деформированного состояния массива. Представлены новые данные о поведении грунтов на различных этапах диссипации, в том числе при отделении от коренного массива возникшей диссипативной геологической структуры в виде оползневой блока.

Abstract: The peculiarities of soil state and strength and its role as a “weak” layer in the groundmass are often represented as the main factor that determines the occurrence of a landslide or its activation. These concepts are usually extended both to shallow shear landslides and liquefaction-flow types, as well as to deep block landslides, such as compression-extrusion type, with the release of so-called “the main deformable horizon” of soils in the latter. The formation of a new landslide block is accompanied by the occurrence of destructive displacements in the landslide cirque, involving in displacements of the whole slope. Such events are common in urbanized areas, on slopes with the development of deep compression-extrusion landslides. This article discusses the mechanism of formation of a landslide block and the geological features of transformation of the stress-strain state of the ground mass. New data on the behavior of soils at various stages of dissipation are presented, including the case when the dissipative geological structure is separated from the bedrock in the form of a landslide block.

Ключевые слова: грунтовый массив, оползневой цирк, глубокий блоковый оползень, напряженно-деформированное состояние грунтов, скашивание грунтов.

Keywords: soil groundmass, landslide cirque, deep block landslide, stress-strain state of soils, skewing of soils.

Введение

В статье рассматривается оползневой цирк, в котором оползневой тело представлено смещёнными блоками (блоковый оползень сжатия-выдавливания [4]). Данные оползни в зарубежной литературе клас-

сифицируются как оползни вращения либо сложные оползни [8]. При естественном развитии оползневой процесс в цирке периодически происходит катастрофическая активизация оползневых деформаций (стадия основного смещения), связанная

с образованием в коренном массиве надоползневой уступа нового оползневой блока. При этом цикл развития оползня (период между активизациями, с образованием и отделением от коренного массива нового оползневой блока) в естественных условиях может достигать сотен и тысяч лет [1]. Формирование и отделение блока связано с трансформацией исходного напряженного состояния, образованием в массиве новых крупных структур, в которых на разных этапах их функционирования проявляются закономерные особенности поведения грунтов.

Исходные прочность и состояние грунтов в массиве

Коренной грунтовой массив, не затронутый оползневой процессом, находится в условиях компрессионного сжатия. Согласно законам физики, в воздушной и водной среде давление в точке вызывается весом столба газа или жидкости над ней (закон Паскаля с учетом земного тяготения). В геологической среде также в соответствии с законами физики давление в точке определяется весом столба грунта, но с учетом сил сопротивления, вызываемых прочностью структурных связей и трением между частицами грунта.

Напряженно-деформированное состояние грунта в точке в условиях компрессионного сжатия характеризуется законом прочности Кулона-Мора [5]:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = \operatorname{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 — наибольшее и наименьшее главные напряжения соответственно; σ_{str} — структурная прочность грунта; φ — угол внутреннего трения грунта.

Структурная прочность σ_{str} определяется как предельное давление при испытании образца грунта на одноосное сжатие. Она характеризует прочность структурных связей грунта, прочность грунта как материала. Аналитически структурная прочность грунта: $\sigma_{str} = 2c \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi/2)$, где c — сцепление грунта.

От вертикального давления $\sigma_{i_i} = \gamma Z_i$ в каждой i -той точке массива (элементарном объёме грунта) на глубине Z_i возникает распорное давление p_i , в соответствии с (1):

$$p_i = \sigma_3 = (\sigma_1 - \sigma_{str}) \cdot \operatorname{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (2)$$

Таким образом, формируется статичное напряженно-деформированное состояние (НДС) в грунтовой массиве, сопровождающееся действием распорного давления по (2) и зависящее от исходных геологических условий и совокупности других факторов, проявляющихся в каждой i -той точке массива.

Грунт в каждой точке характеризуется структурной прочностью, которая зависит от факторов естественного сложения, в том числе влияния тектонических нарушений, особенностей литологии, влажности и величины угла внутреннего трения, в условиях компрессионного сжатия.

Диссипация влияния склона (первый этап диссипации)

Формирование склона, развитие процессов выветривания и оползневых смещений разуплотнённых покровных масс, изменение угла наклона поверхности склона и другие причины вызывают изменение напряжений в каждой i -той точке массива как на участке склона, так и в грунтах, залегающих за бровкой склона (в коренном массиве). Формирование склона и склоновые процессы инициируют разгрузку напряжений в коренном массиве, что проявляется в снижении давления распора в точках в зависимости от степени их близости к бровке склона (зоне разгрузки напряжений). При этом происходит плавное оседание поверхности коренного массива с формированием наклона к бровке склона. В выражении распорного давления появляется новый множитель, который учитывает степень удаления точки в массиве от бровки склона [6]:

$$p_i = (\gamma Z_i - \sigma_{str}) \left(1 - \frac{1}{R_i}\right) \cdot \operatorname{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (3)$$

где $R_i = \Delta_i + R_0$; R_0 — радиус кривизны бровки склона; Δ_i — расстояние от точки по горизонтальной поверхности на глубине Z_i до бровки склона (проекция бровки на горизонт), по нормали к бровке.

Сравнивая выражения (2) и (3), можно отметить, что вертикальное давление сохраняется в точке в исходном значении. Влияние разгрузки напряжений (снижение отпора со стороны склона) и появление деформаций в точке вызывает в основном, в соответствии с (3) и выражением $\sigma_{str_i} = 2c_i \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi_i/2)$, снижение величины сцепления (вследствие деформаций структурных связей) и, соответственно, структурной прочности. Значение угла внутреннего трения практически мало изменяется [6].

Указанные изменения исходных значений состояния и прочности грунта в точках коренного массива происходят в связи с возникновением силовых линий в поле напряжений. НДС изменяется посредством взаимодействия рассматриваемых точек между собой по схеме равенства распора отпору (отпор регламентирует изменение давления в точке), без образования на этом этапе диссипации каких-либо новых границ и структур.

Диссипативные геологические структуры (второй этап диссипации)

Профессором И. Р. Пригожиным (нобелевский лауреат 1977 г., Бельгия) было установлено, что в физических и химических процессах при определенных условиях возникают диссипативные структуры [9]. В работе [5] было показано, что в геологической среде, как и в других средах (воздушной и водной), на участках локального силового возмущения (изменения исходного напряжённо-деформированного состояния (НДС) возникает физический процесс диссипации внешнего воздействия с образованием новых структур. Геологический процесс образования в оползнеопасном коренном массиве диссипативных геологических структур (ДГС) начинается, когда проявилась нижняя граница диссипации (базис диссипации — базис оползания на склоне) и создалась угроза распространения разрушительных оползневых деформаций в грунтах коренного массива. ДГС образуются как защитные структуры, взаимодействующие с оползневым участком и предотвращающие распространение оползневого процесса далее на коренные грунты.

Оползневой цикл на участке естественного развития блокового оползня сжатия-выдавливания завершается образованием относительно ровной оползневой террасы. Высота надоползневого уступа (откоса коренного массива) при этом достигает предельного значения (рис. 1).

На этом этапе в коренном массиве образуются новые диссипативные геологические структуры в виде полуцилиндров [5]. Новые геологические образования выступают как отдельные замкнутые грунтовые массивы с геологическими границами, со своим НДС. На участке оползневого цирка нижней

границей диссипации влияния оползневого процесса и базисом возникших крупных структур в коренном массиве (в сечении по центральному створу) является базис смещения оползневого массива в цирке (поверхность скольжения). Функционирование ДГС определяет закономерности подготовки предельного состояния в оползнеопасном коренном массиве и проявления разрушительных деформаций при отделении и смещении ДГС в виде нового оползневого блока (рис. 2). Новый блок отделяется от коренного массива по границе ДГС, которая в верхней части выглядит как вертикальная «стенка срыва». Далее блок осуществляет вращательное движение по круговой (в вертикальном сечении по центральному створу) поверхности скольжения, которая образовалась в оболочке ДГС (рис. 2).

К настоящему времени известно, что ДГС образуются не только при подготовке оползневых блоков, но и при образовании провалов над подземными полостями, в грунтовом основании под нагрузкой от фундамента сооружения, а также такие структуры выявлены при геодинамическом анализе геологических условий месторождений полезных ископаемых [3, 5, 7].

Грунты внутри ДГС в коренном массиве оползневого участка сохраняют исходную прочность и давление распора в точках, в соответствии с уравнениями (1) и (2). При этом грунты создают общность, объединение в отдельную замкнутую структуру — ДГС. НДС грунтов внутри ДГС практически остается неизменным, как и в исходном положении коренного массива. Основные изменения концентрируются в грунтах по граничной оболочке ДГС (выше поверхности скольжения).

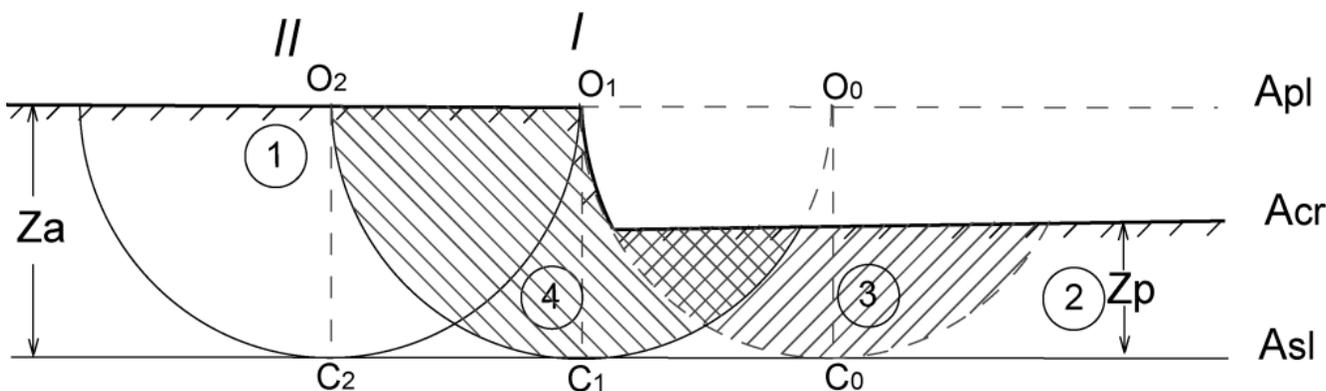


Рис. 1. Схема расположения диссипативных геологических структур по центральному сечению оползневого очага при формировании нового оползневого блока. 1 и 2 — соответственно коренной и оползневой массивы; 3 — смещенный оползневой блок с дневной поверхностью на уровне оползневой террасы, в завершении оползневого цикла; 4 — ДГС (блок) в предельном состоянии надоползневого уступа коренного массива по контакту с оползневой террасой; C_0 , C_1 , C_2 — точки ДГС на горизонте базиса. A_{pl} , A_{cr} и A_{sl} — соответственно уровни плато, оползневой террасы и основной поверхности скольжения (базиса) оползневого массива, ($Z_a - Z_p = H_{cr}$)

Грунты в оболочке находятся под действием напряжений, значительно превышающих распорное давление в точке [5]:

$\sigma_{mi} = Z_a p_i / h$, где σ_{mi} — кольцевое напряжение в оболочке на глубине Z_i , по касательной к круговой границе ДГС; Z_a — глубина от бровки склона (бровки откоса коренного массива) до нижней границы (базиса) ДГС, радиус круговой границы ДГС, в вертикальном её сечении; h — толщина оболочки.

Таким образом, напряжения в грунтах у границы ДГС в Z_a выше, чем давление в точке на глубине Z_i в грунтах ДГС (величина Z_a может составлять десятки и сотни метров). Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям, σ_{mi} превышает p_i более, чем на два порядка.

В оболочке формируется узкая зона по цилиндрической поверхности ДГС, где грунты под действием кольцевых напряжений σ_{mi} и вращательного движения ДГС находятся в условиях скашивания с одинаковой угловой деформацией во всех точках оболочки. Общие условия деформирования регламентируются изменением НДС в нижней точке ДГС, на горизонте её базиса. При этом угловые деформации скашивания вызывают растяжение грунта в узкой зоне оболочки в условиях компрессионного сжатия геологической среды, включая зону оболочки.

НДС грунтов в оболочке. На горизонте базиса (нижней границе диссипации), где, как указано выше, распорное давление в ДГС имеет наибольшее значение, происходит снижение отпора (разгрузка напряжений) со стороны оползневого склона, возникают пластические деформации грунта в нижней части ДГС и, соответственно, снижается напряжение в оболочке. Массив ДГС осуществляет вращательное движение единым жёстким телом по оболочке, как в узкой зоне сдвига, при сохранении её исходной толщины и связей грунтов оболочки и ДГС, т. е. подобно неразрывному угловому скашиванию грунтов в контактной зоне. Происходят осадка грунтов в верхней части оболочки и деформации поворота (вращение в сторону источника силового возмущения — оползневого массива) грунтов, прилегающих к базису. Возможны также деформации скашивания и по внутренним граничным оболочкам, образующим связи между ДГС (рис. 1, линия $C_2 O_1$).

Перемещение ДГС относительно оболочки, подобное скашиванию (схема простого сдвига), происходит в слое толщиной $h = 0,009 Z_a = \text{const}$. Массив ДГС осуществляет вращательное движение в сторону источника возмущения. Процесс деформирования по схеме простого сдвига по всей оболочке ДГС регламентируется изменением



А



Б

Рис. 2. Стенка срыва нового оползневого блока глубокого оползня и разрушительные деформации при активизации оползневого процесса на участке Хорошево-1 (Москва, 2006 г.):

А — на территории храма Живоначальной Троицы;

Б — на территории ЖК «Годуново»

НДС в точке C_1 (рис. 1, ДГС4 с центром O_1). В целях защиты геологической среды от распространения оползневого процесса в ходе развития диссипативного геологического процесса предусмотрена возможность отделения ДГС в виде оползневого блока. Момент отделения наступает, когда в грунтах оболочки на горизонте базиса (точка C_1) перемещение (длина дуги) в процессе скашивания достигает критического значения $\Delta \ell = h$, то есть в оболочке толщиной h при образовании ДГС возникает механизм простого сдвига с ростом угла скашивания между внешней и внутренней поверхностями оболочки. Предельное значение угла скашивания 45° , при котором величина перемещения становится равной толщине h оболочки. В нижней точке ДГС, на горизонте базиса, сдвиг происходит практически в горизонтальном направлении (по касательной к оболочке), а на уровне верхней площадки — вниз

по вертикали, как осадка. При этом критическое значение центрального угла на дугу перемещения составит ноль градусов и (π^3) минут или $\alpha_{cr} = h/Z_a = 0,00901944$ радиана. Данное значение является постоянным независимо от размеров ДГС, то есть $\alpha_{cr} = 0,00901944 = \text{const}$, (как угол поворота жёсткого цилиндра). Соответственно толщина оболочки, в которой происходят основные изменения НДС, зависит от размеров ДГС, в частности его основного параметра — радиуса кривизны Z_a и угла α_{cr} , то есть $h = \alpha_{cr} Z_a$, где α_{cr} в радианах. Поскольку параметры процесса скашивания в оболочке едины на всех горизонтах ДГС, значение относительной осадки ДГС составляет $\varepsilon_{cr} = h/Z_a = 0,009$ (на участке выхода оболочки на поверхность). Таким образом, и по осадке предельное состояние ДГС наступает при критическом её значении $\Delta \ell_{cr}$, когда величина перемещения грунтов массива ДГС относительно оболочки в точке С достигнет

$$\Delta \ell_{cr} = h = 0,009 Z_a, \quad (4)$$

т. е. значение угла скашивания в предельном состоянии, как указано выше, составляет 45° . Следует отметить, что в процессе скашивания грунт испытывает растяжение в условиях компрессии. Если выделить в вертикальном сечении оболочки квадрат со сторонами h , то длина диагонали составит $a_0 = h\sqrt{2}$ (удлинение по сравнению с h составит 1,414).

В предельном состоянии, когда $\Delta \ell_{cr} = h$, диагональ исходного квадрата достигнет значения $a_{cr} = h\sqrt{5}$ (или 1,581 от исходной величины), т. е. удлинение диагонали и, соответственно, деформация грунта при растяжении составит более 50% или в среднем $\pi/2$ раз. Это означает, что в процессе скашивания грунта в узкой зоне оболочки проявляются пластические деформации (практически запредельные для условий свободного растяжения). В скальных и связных глинистых грунтах эти явления отражаются в образовании изгиба слоёв, складок в указанной зоне ДГС. Критическое состояние по прочности грунта в оболочке и переход от режима скашивания в деформирование сдвига регламентируется изменением НДС на уровне базиса (в точке C_1 по центральному створу) и достигается одновременно по всей оболочке.

Оценка предельного состояния

Уравнение предельного состояния коренного массива надоползневого уступа выводится из рассмотрения взаимодействия ДГС в коренных грунтах и в оползневом массиве (граничном блоке — прилегающем к коренному массиву смещённом ДГС, рис. 1):

$$\gamma Z_a - \sigma_{str,a} = \pi \gamma - \frac{Z_a - H_{cr}}{2}, \quad (5)$$

где Z_a — глубина до базиса оползания блока, γ — среднее значение удельного веса грунта до глубины Z_a , $\sigma_{str,a}$ — исходное значение структурной прочности грунта в ДГС на глубине Z_a , H_{cr} — критическое значение высоты откоса ДГС.

В соответствии с рисунком 1, анализируется НДС ДГС4 (в коренном массиве) и ДГС3 (в оползневом массиве) в сечении по центральному створу, в частности напряжения в оболочке на горизонте базиса (точка C_1) с учетом прочности грунтов в данной точке.

Следует иметь в виду, что в ДГС, как и в точке массива, действует распорное давление (2). ДГС выступает как «крупная точка», в которой отпор (со стороны оползневого склона) создаётся напряжениями в оболочке, с максимальными их значениями по нижней границе ДГС (базису A_{sl}), определяющими с учётом прочности грунтов в этой зоне и взаимодействия с геологическим процессом (оползевым), воздействующим на НДС грунтов на уровне базиса, условия равновесия ДГС по (5).

О возникновении ДГС. Переход от первого этапа диссипации ко второму (с образованием ДГС) недостаточно изучен. Как показали исследования В. В. Жихович [2], при напряжениях, не превышающих 80% от предельных, при длительном периоде изменения напряжений в массиве, что имеет место при развитии глубоких оползней, существенных изменений в напряженно-деформированном состоянии в грунтовом слое массива происходить не может (рис. 3).

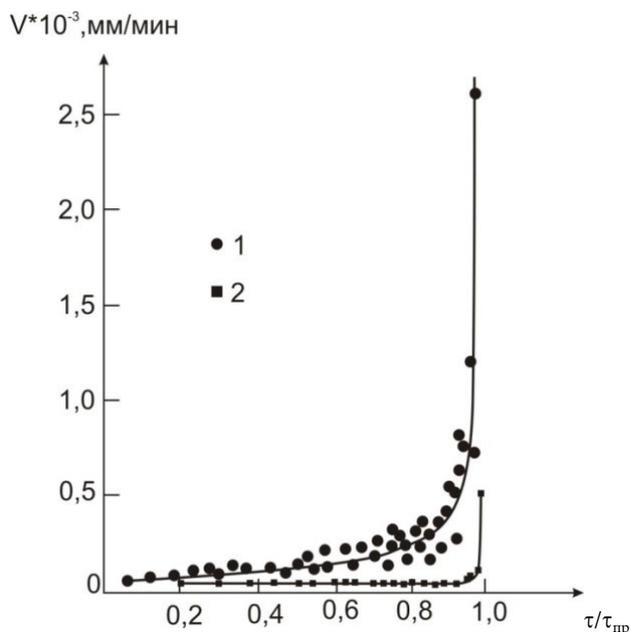


Рис. 3. Графики зависимости скорости ползучести от уровня напряжений при различном темпе нагружения глинистого грунта по В. В. Жихович [2]. 1 — испытание по схеме час-ступень; 2 — по схеме сутки-ступень.

По всей вероятности, до момента наступления предельного состояния по (5) ДГС и границы между ними в коренном массиве не проявляются. На заключительном этапе завершения оползневой цикла, когда возникает реальная угроза вовлечения в оползневой процесс и грунтов коренного массива, в нем возникают ДГС. В соответствии с результатами исследований В. В. Жихович, этот момент может быть достигнут, когда состояние коренного массива может составлять 0,8–0,9 от предельного по (5), на горизонте базиса по центральному створу. Далее начинается вращательное движение ДГС надоползневого уступа, образуется трещина закола в верхней части оболочки ДГС, и начинаются процессы скашивания грунтов в оболочке.

Отделение ДГС-блока. Нарушение равновесия по (4) и (5) приводит к резкому изменению НДС грунтов по контакту ДГС с оболочкой и отделению массива ДГС от оболочки на всём её протяжении с вращательным движением массива. Разрушение грунтового массива с отделением блока происходит по схеме компрессионного сжатия (исходные условия), где изменение НДС и подготовка предельного состояния развиваются по закону Кулона-Мора в главных напряжениях. Причём смещение массива ДГС относительно оболочки, как указано выше, вначале происходит по механизму скашивания (с поворотом ДГС), а после достижения критерия (4), в условиях предельного состояния по (5), и отделения ДГС по оболочке, развивается далее по образовавшемуся контакту с грунтами в оболочке как вращательное движение по подготовленной поверхности. У связанных глинистых и скальных грунтов процесс отделения и смещения оползневого блока приобретает катастрофический характер, поскольку происходит

разрыв структурных связей в грунтах оболочки и, соответственно, сцепление и структурная прочность грунтов по контакту становятся равными нулю.

Выводы

Геологической средой предопределяется отделение ДГС в виде нового оползневого блока в ходе развития диссипативного геологического процесса как завершающего этапа изменения исходного НДС в целях защиты геологической среды (коренного массива) на данном участке от оползневого процесса и возвращения НДС в массиве к исходным условиям.

Механизм отделения, в соответствии с теоретическими исследованиями и анализом данных натуральных наблюдений, включает развитие деформаций в грунтах оболочки по схеме простого сдвига со скашиванием его нормальных к поверхности сечений до угла 45° (в предельном состоянии). При этом величина сдвига грунтов оболочки оказывается равной её толщине, а критическое значение центрального угла в ДГС на дугу сдвига составляет 0,009 радиан, соответственно, и отношение $h/Z_a = \alpha_{cr} = 0,009 = \text{const}$.

Катастрофичность развития оползневого смещения нового блока во многом определяется возникновением моментов сил, действующих в оболочке ДГС-блока. Если в предельном состоянии уравнение (5) определяет равновесие напряжений в нижней части ДГС, на горизонте базиса, то после отделения ДГС момент сдвигающих сил превышает момент удерживающих сил в $\pi/2$ раз (отделившийся блок становится оползневым, и в правой части уравнения (5) также появляется коэффициент $\pi/2$), что приводит к катастрофическому изменению соотношения сил и возникновению разрушительных оползневых деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянова Е. П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. 308 с.
2. Жихович В. В. О наличии оползней выдавливания на склонах одесского побережья // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 5. С. 7–11.
3. Казанкова Э. Р., Корнилова Н. В. Структурирование геологической среды на различных уровнях организации // Актуальные проблемы нефти и газа. Вып. 1 (20). 2018. С. 1–15.
4. Оползни и сели / Шеко А. И., Постоев Г. П., Кюнтцель В. В. и др. / Гл. ред. Козловский Е. А. — М.: Произв.-изд. комбинат ВИНТИ, 1984. — Т. 1. — 352 с.
5. Постоев Г. П., Кучуков М. М., Казеев А. И. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 6. С. 22–31.
6. Постоев Г. П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.; СПб.: Нестор-история, 2013. 100 с.
7. Постоев Г. П. Модели механизма формирования и расчёта провалов земной поверхности над подземными полостями // Геоэкология, 2020. № 4. С. 36–47.
8. Cruden D. M., Varnes D. J. Landslide types and

- processes. In: Turner A. K.; Shuster R. L. Landslides: Investigation and Mitigation: Transportation Research Board, US National Research Council. Washington, D. C., 1996. Spec. Rep. No. 247. P. 36–75.
9. Prigogine I., Nicolis G. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations. New York: J. Wiley & Sons, 1977

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-2-19-65-75>
УДК 624.131.1

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСНОВАНИЯ УЧАСТКА СКОРОСТНОЙ АВТОДОРОГИ МОСКВА — САНКТ-ПЕТЕРБУРГ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО УСИЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУРОВЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

ENGINEERING AND GEOLOGICAL ASSESSMENT OF THE FOUNDATION OF THE MOSCOW — ST. PETERSBURG EXPRESSWAY SECTION AND THE RESULTS OF ITS REINFORCEMENT USING DRILLING AND BLASTING TECHNOLOGY

© 2022 г. Е. В. Городнова¹, Н. Г. Корвет², Суворова Е. А.³

© 2022 Elena V. Gorodnova¹, Nadeshda G. Korvet², Ekaterina A. Suvorova³

^{1,3} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

^{1,3} Federal State Budget Educational Institution for Higher Education «Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University», St. Petersburg, Russian Federation

² ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² «Russian State Hydrometeorological University», St. Petersburg, Russian Federation

elena.gorodnova@mail.ru¹, nnkorvet2010@yandex.ru², suvorova_e_a@mail.ru³

Аннотация: В статье рассматриваются особенности возведения участка подходной насыпи к мостовому переходу через р. Коломенка скоростной автодороги Москва — Санкт-Петербург. Присутствие в разрезе структурно-неустойчивых грунтов вызвало проблемы при инженерном освоении участка, выразившиеся, прежде всего, в деформации грунтовой толщи основания. Оценка физико-механических свойств грунтов показала невозможность их использования без применения методов повышения несущей способности. Для усиления основания участка выполнялся комплекс работ с применением метода глубинного уплотнения грунтов и использованием буровзрывной технологии, который позволил стабилизировать толщу слабых грунтов и уплотнить рыхлые пески.

В статье представлены сведения об инженерно-геологических условиях участка подходной насыпи к мостовому переходу и результаты выполненных работ по стабилизации основания насыпи, подтверждаемые геодезическими наблюдениями и инженерно-геофизическими исследованиями.

Abstract: The article discusses the features of the construction of a section of the approach embankment to the bridge crossing over the Kolomenka River of the Moscow — St. Petersburg expressway. The presence of structurally unstable soils in the section caused problems during the engineering development of the site, which were expressed, first of all, in the deformation of the soil thickness of the base. Evaluation of their physical and mechanical properties of soils showed the impossibility of using them without the use of methods to increase their bearing capacity. To strengthen the base of the site, which allows to stabilize the thickness of weak soils and compact loose sands, a complex of works was carried out using the method of deep compaction of soils using drilling and blasting technology.

The article presents information about the engineering and geological conditions of the site of the approach embankment to the bridge crossing and the results of the work performed to stabilize the base of the embankment, confirmed by geodetic observations and engineering and geophysical studies.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия; структурно-неустойчивые грунты; деформация грунтовой толщи; стабилизация основания земляного полотна; буровзрывная технология.

Keywords: engineering and geological conditions; structurally unstable soils; deformation of the soil column; stabilization of the foundation of the roadbed; drilling and blasting technology.

Введение

При обосновании строительства сооружения в пределах конкретных территорий, одной из первоочередных задач является инженерно-геологическая оценка грунтов, которые выступают как основной элемент геологической среды и являются основанием или средой для этих сооружений. Взаимодействие грунтов с сооружением в значительной степени определяется их разнообразием, и соответственно, различными строительными качествами, а также условиями их залегания в геологическом разрезе, что является основой для принятия наиболее рациональных решений при инженерном освоении территорий.

По своим инженерно-геологическим особенностям, строительным качествам, специфическими являются грунты с неустойчивой структурой — структурно-неустойчивые, к числу которых относятся сильносжимаемые грунты (илы, торфа, насыпные грунты, озёрно-ледниковые глины ленточные), требующие принятия оптимальных в данных условиях решений для возможности их использования в качестве оснований сооружений, что, как показывает практика строительства, весьма непросто. Строительство на подобных грунтах актуально для многих территорий, как в России, так и за ее пределами, поэтому проблема обеспечения устойчивости оснований, сложенных ими, в практике проектирования зданий и сооружений является достаточно важной. Решением для такой задачи может быть предварительное улучшение свойств грунтов путем их преобразования тем или иным способом [1].

Объектом, характеризующимся наличием в геологическом разрезе структурно-неустойчивых грунтов разного генезиса, является скоростная автомагистраль М-11 «Нева», соединяющая Москву с Санкт-Петербургом. Разработка проекта дублёра существующей автодороги Москва — Санкт-Петербург М-10 «Россия» велась на протяжении длительного периода времени. Так, в генплан развития Москвы и Московской области первоначальная концепция дублёра была включена в начале 1970-х годов. К идее создания трассы вернулись в начале 2000-х, т. к. интенсивность движения на трассе М-10 «Россия» при нормативной пропускной способности 40 тысяч автомобилей в сутки доходила до 150 тысяч автомобилей, что превышало нормативную загрузку как минимум в три раза. При этом средняя скорость движения по трассе на подъезде к Москве составляла не более 10 км/ч. Данный график движения автомобилей спровоцировал повышение уровня загрязнения воздуха на данной территории (в 3–5 раз), принятые в Российской Федерации санитарные нормы.

В мае 2005 года прошли общественные слушания, после чего проект получил необходимые разрешения и согласования, которые явились основой для обоснования строительства скоростной автомобильной дороги М-11 «Москва — Санкт-Петербург». Новая трасса стала решением многих проблем Центрального и Северо-Западного федеральных округов и их наиболее развитых районов, связанных, прежде всего с разгрузкой существующей дороги М-10 «Россия» и улучшением экологической обстановки территории.

Инженерно-геологические условия трассы являются сложными, поэтому многие её участки вызвали определённые проблемы при их инженерном освоении из-за присутствия в геологическом разрезе мощной толщи торфов, а также глинистых грунтов с консистенцией от текучей до мягкопластичной. Один из таких участков расположен в Тверской области РФ на пересечении трассы рекой Коломенка. В статье рассматриваются особенности его инженерного освоения для строительства подходной насыпи к мостовому переходу.

1. Общие сведения об участке строительства

Участок входит в состав скоростной автомобильной дороги Москва — Санкт-Петербург (рис. 1). В административном отношении он относится к Бологовскому району Тверской области, находится на пересечении трассы рекой Коломенка, через которую было предусмотрено строительство мостового перехода, и расположен в пределах её ежегодно затопливаемой поймы шириной до 200 м, кочковатой, покрытой густой травой и местами тростником. В пойме, особенно вблизи уреза воды, находятся узкие труднопроходимые заболоченные участки, так как район относится к зоне избыточного увлажнения, является равнинным, с небольшими относительными превышениями, и характеризуется неудовлетворительным поверхностным стоком.

В геоморфологическом отношении территория относится Русской равнине и расположена на Валдайской возвышенности с крупнохолмистым и грядовохолмистым рельефом, слабо расчлененным эрозией, с множеством озер и болот. Ранее, на участке, в 1977 г., проводились геолого-съёмочные работы с целью составления региональных карт масштаба 1:200000 и для уточнения литолого-геологических границ региона [2].

Согласно инженерно-геологическому районированию, территория располагается в пределах инженерно-геологического региона второго порядка — Московской синеклизы, а в гидрогеологическом отношении относится к Московскому артезиан-

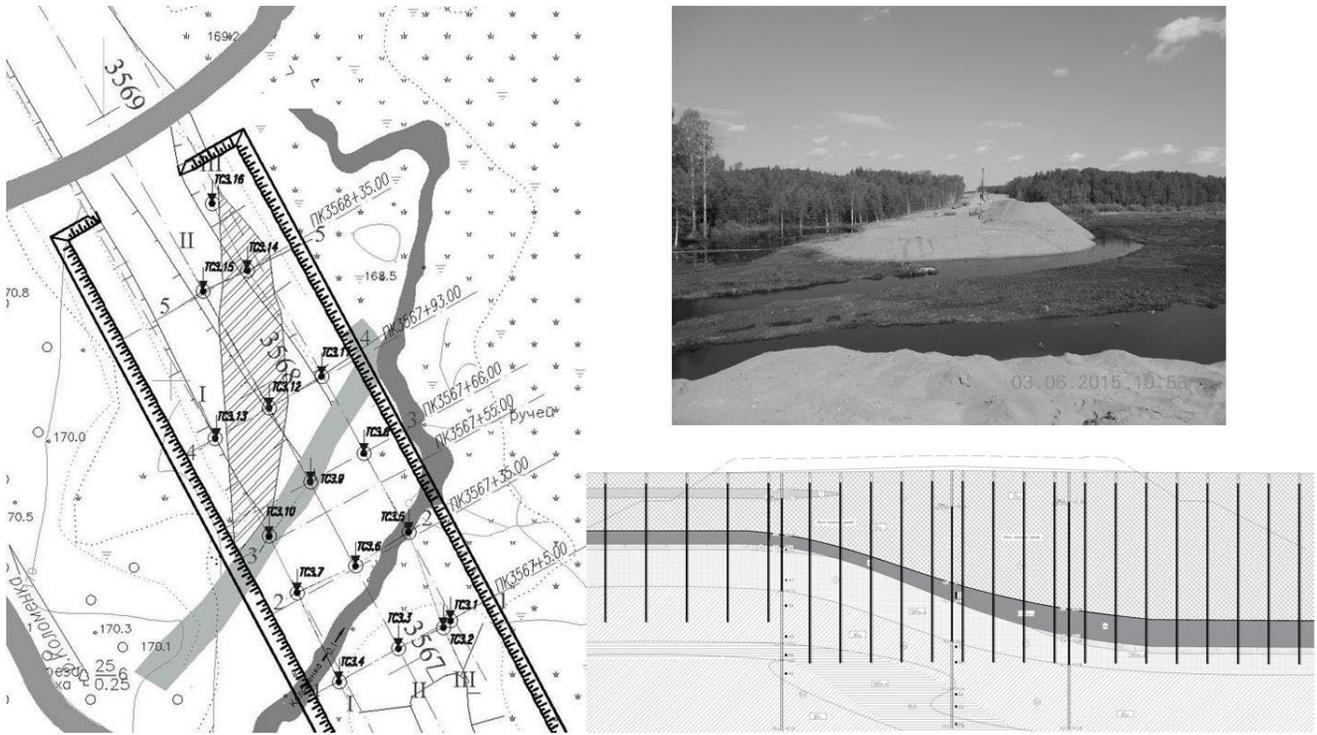


Рис. 1. Участок мостового перехода через реку Коломенку скоростной автодороги Москва-Санкт-Петербург М-11.

скому бассейну [3, 4]. Инженерно-геологические условия участка мостового перехода являются сложными из-за заболоченности участка и залегания в разрезе слабых, со строительной точки зрения, грунтов разного генезиса.

2. Материалы и методы исследования

Для оценки инженерно-геологических условий участка строительства мостового перехода через р. Коломенка с целью принятия оптимальных решений при выборе площадки расположения проектируемого сооружения, поэтапно проводился полный комплекс инженерных исследований, в процессе которых последовательно выполнялись поставленные задачи.

На начальном этапе работ, включавших бурение скважин и статическое зондирование на обоих берегах реки, основной задачей было определение глубины залегания надежных пород основания. Скважинами, вскрывшими с поверхности и близко к ней торф, было установлено, что под ледниковыми отложениями gIIIv на глубинах от 39,0 м до 41,0 м залегают известняки каменноугольного возраста (рис. 2).

В процессе дальнейшей работы проводилось уточнение геологического строения участка мостового перехода и дополнительные исследования с целью более детальной оценки инженерно-геологических разрезов и физико-механических характеристик слагающих их грунтов, так как было выяв-

лено несоответствие вновь полученных данных по напластованию грунтов на участке результатам ранее проведенных изысканий.

В ходе изысканий, было установлено, что до исследуемой глубины 46,0 м в геологическом строении принимают участие породы четвертичного и каменноугольного возраста (рис. 2 и 3).

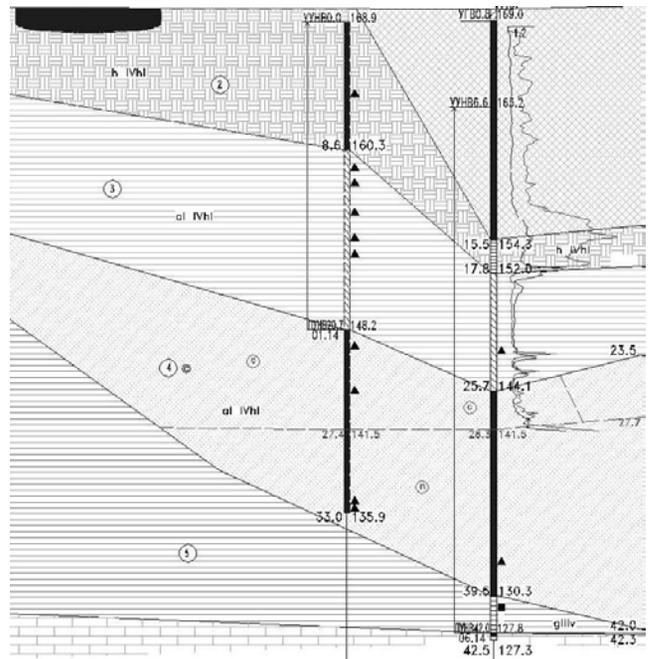


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез по пробуренным скважинам, вскрывшим с поверхности и на глубине торфа, в основании — известняки.

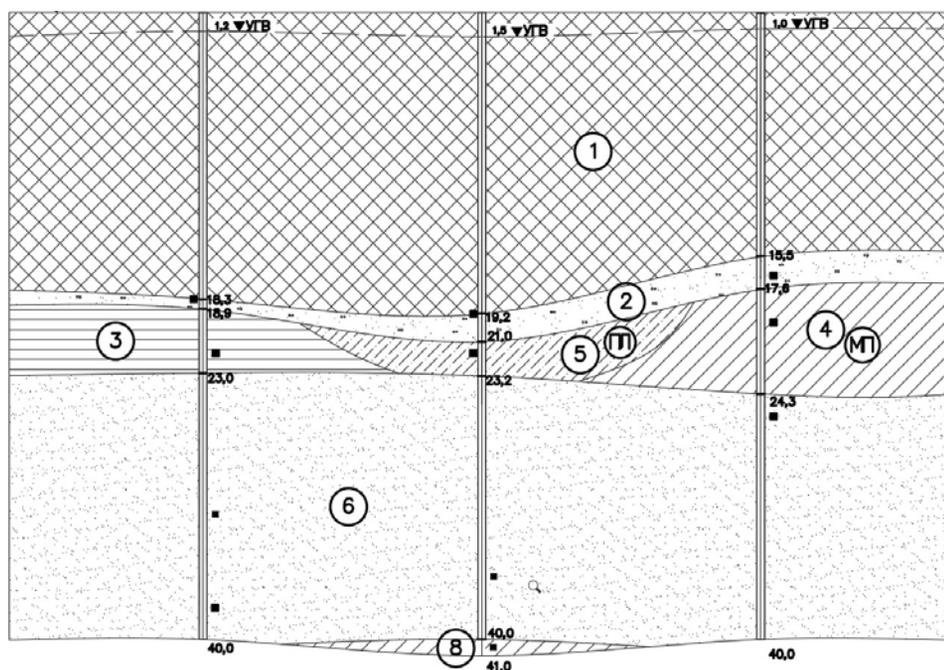


Рис. 3. Инженерно-геологический разрез участка через р. Коломенка.
 1 — насыпные грунты tIV,
 2 — торф; заторфованные пески — hIII–IV;
 3 — глины текучие и суглинки текучие и текучепластичные — lgIII–IV;
 4 — суглинки lgIII;
 5 — супеси gIII;
 6 — пески разнозернистые (lg II–III);
 7 — супеси (g II);
 8 — суглинки (g II).

Современные отложения представлены техногенными насыпными грунтами: песком средней крупности и торфами (tIV), вскрытыми повсеместно; болотными отложениями — торфами (hIVhl), вскрытыми под насыпными грунтами и с поверхности. К пойме р. Коломенка приурочены аллювиальные отложения (alIVhl), залегающие под техногенными и болотными и представленные глинистыми грунтами (с примесью органических веществ или отсутствием примеси), а также песками средней крупности с прослоями песка различной крупности, различной плотности.

Значительная часть разреза сложена современными и верхнечетвертичными отложениями, представленными биогенными образованиями (hIII–IV) (торф, заторфованные пески) и озёрно-ледниковыми (lgIII–IV) глинами и суглинками.

Большинством скважин под аллювиальными отложениями вскрыты верхнечетвертичные отложения: озёрно-ледниковые суглинки (lgIII) и ледниковые (gIII) глинистые грунты с включениями гравия, гальки и валунов, с прослоями глины, суглинка и супеси, в отдельных местах — песка.

Также в разрезе присутствуют верхне- и среднечетвертичные отложения: озёрно-ледниковые пески разнозернистые (lgII–III), среднечетвертичные пески мелкие (f,lg IIms), ледниковые глины, супеси и суглинки (g IIms).

В основании вскрытого разреза залегают каменноугольные известняки трещиноватые (C₁).

Изучение физико-механических свойств грунтов участка строительства проводилось в соответствии с действующими нормативными документами.

Подземные воды на площадке мостового перехода приурочены к четвертичным и каменноугольным отложениям и гидравлически связаны между собой водой в реки Коломенка, представляя единый водоносный горизонт. В современных четвертичных отложениях, представленных торфом и насыпным песком средней крупности, они являются безнапорными. Их питание происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и снеготаяния. На участке они вскрыты в интервалах глубин 0,0–6,4 м. Напорные воды зафиксированы в интервале глубин 31,5–39,2 м в современных аллювиальных и верхнечетвертичных песках и каменноугольных известняках. Они имеют гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-магниевый состав. По степени агрессивного воздействия воды на бетон марки W4, оцениваются как неагрессивные; к арматуре железобетонных конструкций — как слабоагрессивные при периодическом смачивании и неагрессивные — при постоянном смачивании.

3. Результаты и обсуждение

Строительство однопролетного моста с подходами насыпями первоначально планировалось над руслом реки Коломенка. При инженерном освоении участка возникли определённые трудности из-за некорректности ранее выполненных изысканий. На этапе устройства свайного основания выяснилось, что сваи не обеспечивают требуемую несущую способность, т. к. погружение опытных свай при их забивке под мостовую опору оказалось больше глубины, указанной в проекте («сваи проваливались»). Сложные инженерно-геологические

условия участка сделали невозможным устройство свайного поля на участке существующего русла реки.

Проектную документацию откорректировали, и было принято решение о переносе русла реки. Соответственно также возник вопрос изменения местоположения моста в зону с наименьшей глубиной залегания слабых грунтов (на 150 метров дальше первоначально выбранной площадки).

На участке прежнего русла реки необходимо было осуществить комплекс работ, связанных с созданием подходной насыпи к мосту.

Анализ инженерно-геологических особенностей участка мостового перехода показал, что значительная часть разреза представлена глинистыми отложениями различной консистенции, залегающими в виде выклинивающихся линз и пропластков под торфами и насыпными грунтами. Наличие их, наряду с торфом, явилось причиной проблем, которые возникли при инженерном освоении участка и выразились в деформации грунтовой толщи там, где она имеет максимальную мощность. Отсыпка площадки под свайное поле песком мощностью до 20 м вызвала неблагоприятные процессы в этих грунтах, испытывающих значительную нагрузку от вышележащей толщи. При этом происходило частичное выдавливание торфов и глинистых грунтов текучей и текучепластичной консистенции в стороны и частичная их консолидация. На

отдельных участках было установлено значительное уплотнение торфа, и, как следствие, его сильная осадка. На рисунке 4 представлен фрагмент схематического инженерно-геологического разреза, демонстрирующий значительную осадку торфа после отсыпки площадки под свайное поле. Также наблюдалось интенсивное проседание насыпи с выпором остатков торфа в сторону русла и по бокам платформы, при этом максимальная осадка по данным геодезических наблюдений составила около 1140 см [5].

С целью принятия решений по обеспечению устойчивости основания насыпи, проводилась оценка состава и физико-механических свойств тофов, заторфованных песков и глинистых отложений, которая охарактеризовала их следующим образом.

Торфа и заторфованные пески (tIV) мощностью от 0,5 м до 2,5 м вскрыты скважинами в различных точках участка под насыпными грунтами (песками различной крупности, мощность которых достигает 25,0 м. Относительное содержание органического вещества (I) в них изменяется в узких пределах, достигая 40 и 50%, что свидетельствует о граничном физическом состоянии испытанных образцов [6]. Таким образом, сильноторфованные пески (I=0,41) и торфа (I=0,50) близки по своему состоянию, что и подтверждают полученные данные (табл. 1).

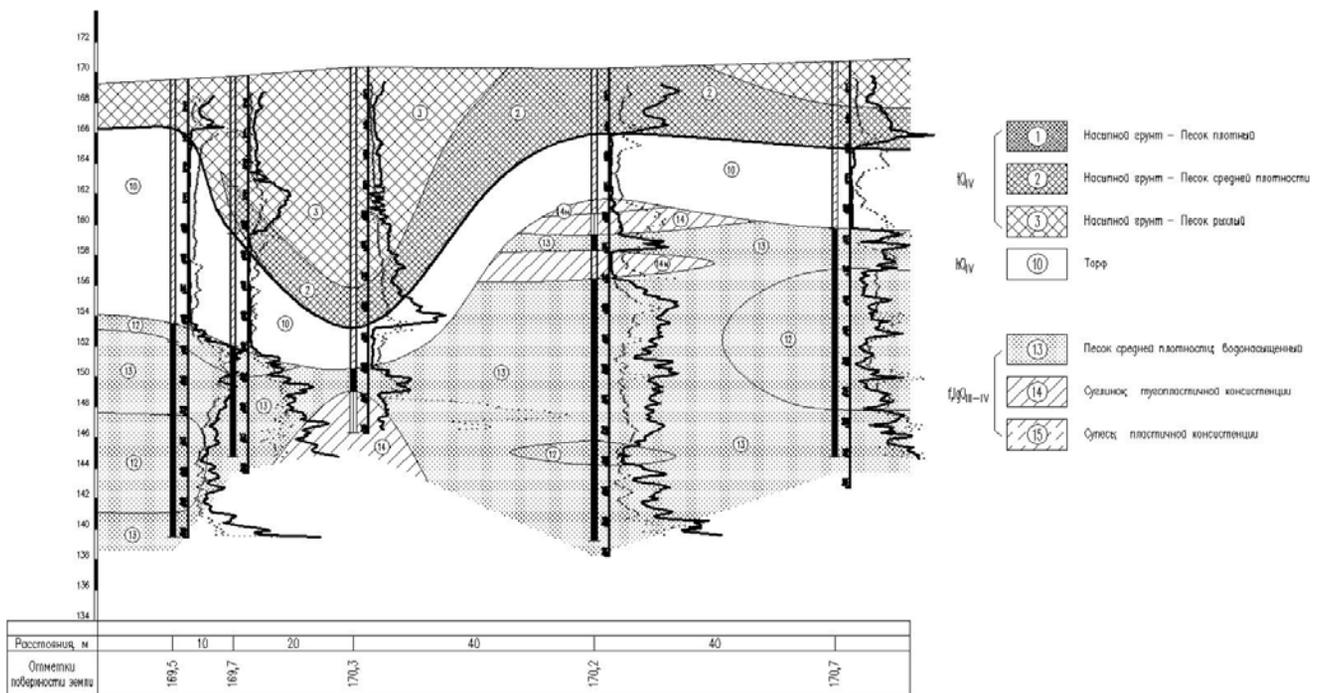


Рис. 4. Схематический инженерно-геологический разрез, характеризующий значительную осадку торфа после отсыпки площадки под свайное поле.

Таблица 1. Сводная таблица физических свойств торфов и заторфованных песков

Показатели физического состояния	Торф	Заторфованные пески
Влажность естественная, д. е.	1,59...2,72	1,60...2,92
Плотность, г/см ³	1,03...1,09	1,07...1,28
Плотность сухого грунта, г/см ³	0,28...0,44	0,27...0,49
Плотность минеральной части, г/см ³	1,65...1,96	2,08...2,48
Коэффициент пористости, д. е.	3,45...5,61	3,84...6,61
Степень водонасыщения, д. е.	0,90...0,92	0,92...1,00
Полная влагоёмкость, д. е.	1,76...3,01	1,61...3,18

Основные сложности при инженерном освоении участка были обусловлены наличием в разрезе «слабых» глинистых грунтов, приуроченных к различным его частям как по площади, так и по глубине. При их оценке основное внимание было направлено на изучение аллювиальных отложений (alIVhl), а также озёрно-ледниковых образований (современные и верхнечетвертичные; верхнечетвертичные), занимающих значительную часть разреза. Показатели их физического состояния представлены в таблице 2.

Анализ полученных результатов показал, что глинистые аллювиальные и озёрно-ледниковые отложения имеют значительную влажность, которая во многих случаях превышает значения 0,40, достигая 0,70. Они характеризуются текучепластичной и текучей консистенцией (показатель текучести > 0,75 и > 1,00) и лишь в некоторых случаях — мягкопластичной (показатель текучести составляет 0,56...0,61).

Следует отметить, что показатели физического состояния современных аллювиальных (alIVhl), а также современных и верхнечетвертичных озёрно-ледниковых (lgIII–IV) глинистых отложений (глины и суглинки) близки по своим значениям, показатель относительной влажности, позволяющий судить об их относительной дегидратированности, превышают единицу, в то время как верхнечетвертичные озёрно-ледниковые (lgIII) суглинки характеризуются меньшей влажностью и большей плотностью, показатель относительной влажности составляет 0,85...0,86.

Оценка прочностных и деформационных характеристик озёрно-ледниковых (lgIII–IV) глинистых отложений, полученных в результате сдвиговых и компрессионных испытаний, показала, что они обладают малой прочностью и значительной сжимаемостью. Для глин текучих и суглинков текучих угол внутреннего трения (ϕ , град) составляет 8,89 при сцеплении (C, МПа) — 0,007, модуль деформации (E_0 , МПа) — 2,524.

Таким образом, грунты, слагающие разрез участка, характеризуются высокой естественной влажностью, малой плотностью, а также значительной и неравномерной деформируемостью — сжимаемостью, что свидетельствует о невозможности их использования в качестве основания насыпи без улучшении строительных свойств.

На основе анализа и оценки инженерно-геологических особенностей участка мостового перехода, а также их влияния на производство работ на различных этапах инженерного освоения площадки

Таблица 2. Сводная таблица физических свойств глинистых аллювиальных и озёрно-ледниковых отложений

Показатели физического состояния	Современные аллювиальные отложения (alIVhl)	Современные и верхнечетвертичные отложения lgIII-IV		Верхнечетвертичные отложения lgIII
		Без органики	С примесью органического вещества	
Влажность, д. е.	0,40 ...0,46	0,41...0,70	0,36 ...0,63	0,28 ...0,29
Влажность на границе текучести, д. е.	0,44...0,52	0,27 ...0,57	0,29...0,60	0,32 ...0,34
Влажность на границе раскатывания, д. е.	0,22, ...0,27	0,19 ...0,36	0,20 ...0,31	0,22...0,23
Число пластичности, д. е.	0, 21...0,27	0,08...0,21	0,09 ...0,29	0,10 ...0,11
Показатель текучести, д. е.	0,77...0,89	0,78...2,10	0,87...1,66	0,56...0,61
Показатель относительной влажности, д. е.	0,98...1,05	>1	>1	0,85...0,86
Плотность грунта, г/см ³	1,73...1,86	1,59...2,00	1,62 ...1,86	1,95...1,97
Плотность сухого грунта, г/см ³	1,21...1,28	0,93...1,60	1,00...1,37	1,51...1,54
Плотность минеральной части, г/см ³	2,70...2,74	2,71...2,78	2,71 ...2,74	2,71...2,72
Коэффициент пористости, д. е.	1,12...1,25	0,69...1,97	0,98...1,75	0,76 ...0,80
Степень влажности, д. е.	0,94...1,00	0,91...1,00	0,94...1,00	0,98 ...0,99
Потери при прокаливании, %	4,4...6,6		4,4...6,6	

строительства были сделаны выводы о необходимости уплотнения рыхлых насыщенных водой песков, упрочнения органических и слабых глинистых грунтов и определены мероприятия для этих целей.

В мировой практике строительства известен целый ряд технологий, позволяющих поддерживать стабильное состояние земляного полотна. Вопросы улучшения физико-механических свойств оснований грунтовых сооружений изложены в большом количестве научных публикаций и в значительной степени обобщены в соответствующей работе [10]. Разработками уплотнения грунтов оснований взрывным методом с 1949 года занимались специалисты кафедры «Подземные сооружения, основания и фундаменты» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета под руководством профессора В. А. Флорина и профессора П. Л. Иванова [7,8,14]. Данный способ уплотнения грунтов успешно применялся в строительстве сооружений различного назначения в РФ и за рубежом [9,12].

Решением проблемы, связанной с повышением несущей способности грунтов основания подходной насыпи на участке прежнего русла реки Коломенка, в рамках научно-исследовательской работы занимались сотрудники кафедры «Основания и фундаменты» ФГБОУ ВО ПГУПС под руководством профессора В. М. Улицкого [6, 11, 13]. Вопросы ускорения консолидации слабых грунтов и уплотнения рыхлых песков были разработаны в утвержденной проектной документации, кроме этого, параллельно была выполнена научно-исследовательская работа, посвященная созданию прочного основания подходной насыпи в сложных инженерно-геологических условиях. Предложенный метод на основе формирования вертикальных песчаных дрен с применением буровзрывной технологии зарекомендовал себя как один из наиболее эффективных и экономичных способов ускорения процесса консолидации торфов, текучих и текучепластичных глинистых грунтов, а также уплотнения рыхлых песков. Суть метода заключается в поочередном или групповом взрывании зарядов, вызывающих разжижение и уплотнение несвязных грунтов, или образовании песчаной сваи дрены в связных грунтах с последующим их уплотнением [15].

Таким образом, для стабилизации насыпи на водонасыщенных несвязных грунтах была применена технология по усилению слабой толщи под основанием дорожной насыпи и по уплотнению песка дорожного полотна, сопровождающаяся созданием вертикальных песчаных дрен с использованием энергии взрыва, что предполагало ускоре-

ние консолидации слабых органических грунтов, а также уплотнение рыхлых песков [8].

Период производства работ по стабилизации основания дорожной насыпи составил 2,5 года (3 этапа), в течение которого проводились следующие виды исследований:

1) инженерно-геофизические изыскания, которые включали в себя: электроразведку, сейсморазведку, георадиолокационное профилирование; мониторинг изменения порового давления в толще песчаных и глинистых грунтов;

3) геодезический мониторинг, состоящий из плано-высотного определения смещения деформационных марок, величин суммарных накопленных осадок, лазерного сканирования поверхности объекта;

2) инженерно-геологические изыскания: отбор проб, статическое зондирование для уточнения геологического строения участка;

4) инклинометрические измерения. С помощью скважинного инклинометра определены границы скольжения грунтового массива.

В процессе работ проводилось бурение контрольных скважин и вблизи каждой скважины выполнялось статическое зондирование (СЗ). Полученные данные позволили оценить изменения, происходящие в массиве грунта, и качество выполненных буровзрывных работ.

Для наглядности результатов исследования на рисунке 5 представлен один из разрезов исследуемой насыпи. Приведено изменение геологического разреза, исследуемого в нескольких точках СЗ (ТСЗ) до начала и после завершения работ. Из анализа данных зондирования видно, что насыпной песок (слой 1), ранее находившийся в рыхлом состоянии, был уплотнен до плотного состояния. При этом для обеспечения проектной отметки верха дорожной насыпи дополнительно производилась песчаная отсыпка. Таким образом увеличилась мощность слоя 1 от 2,6 до 13,3 м (рис. 5)

Геодезические наблюдения за высотным положением осадочных марок, установленных по оси земляного полотна и пригрузочным бермам, позволили оценить величины деформаций, скорости их развития, а также неравномерности деформаций.

В результате геодезической съемки было зафиксировано, что осадка основания земляного полотна происходила с большей скоростью в процессе производства работ, а в промежутках между этапами взрывных работ наблюдалась ее стабилизация (рис. 6).

Также при сравнении третьего этапа производства с двумя предшествующими, можно заметить, что в период проведения буровзрывных работ ско-

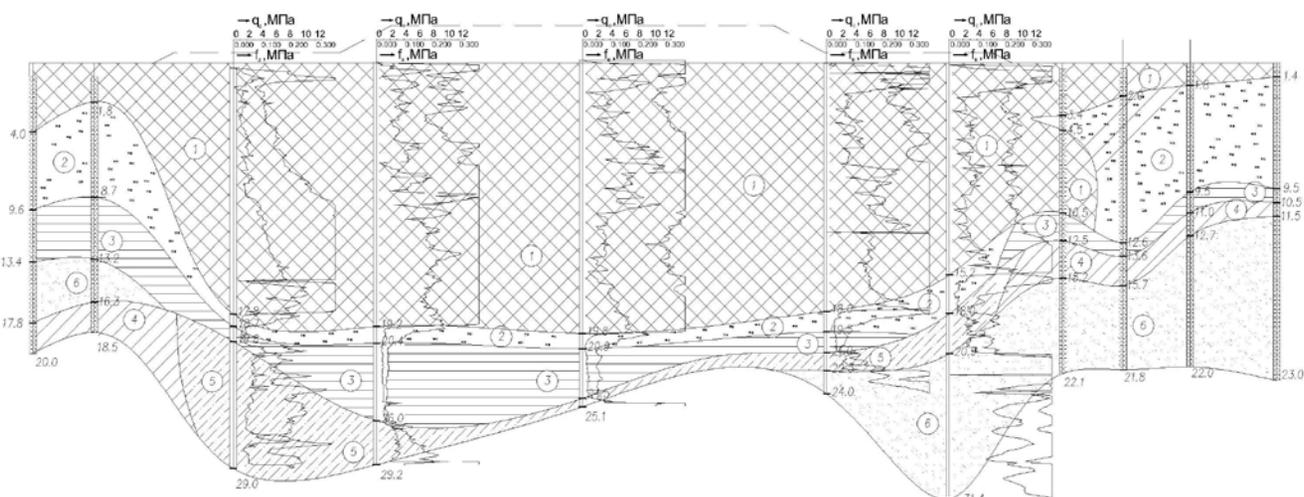


Рис. 5. Поперечный разрез исследуемой насыпи.цифра в кружках: 1 — насыпные пески (t, IV); 2 — торфы, заторфованные пески (h,QIII–IV); 3 — глина текучая, суглинки текучепластичные и текучие (QIII–IV); 4 — суглинок твердый и мягкопластичный (Iq,QIII); 5-сулесь твердая и пластичная (g, QIII); 6 — пески разной крупности (QII–III)

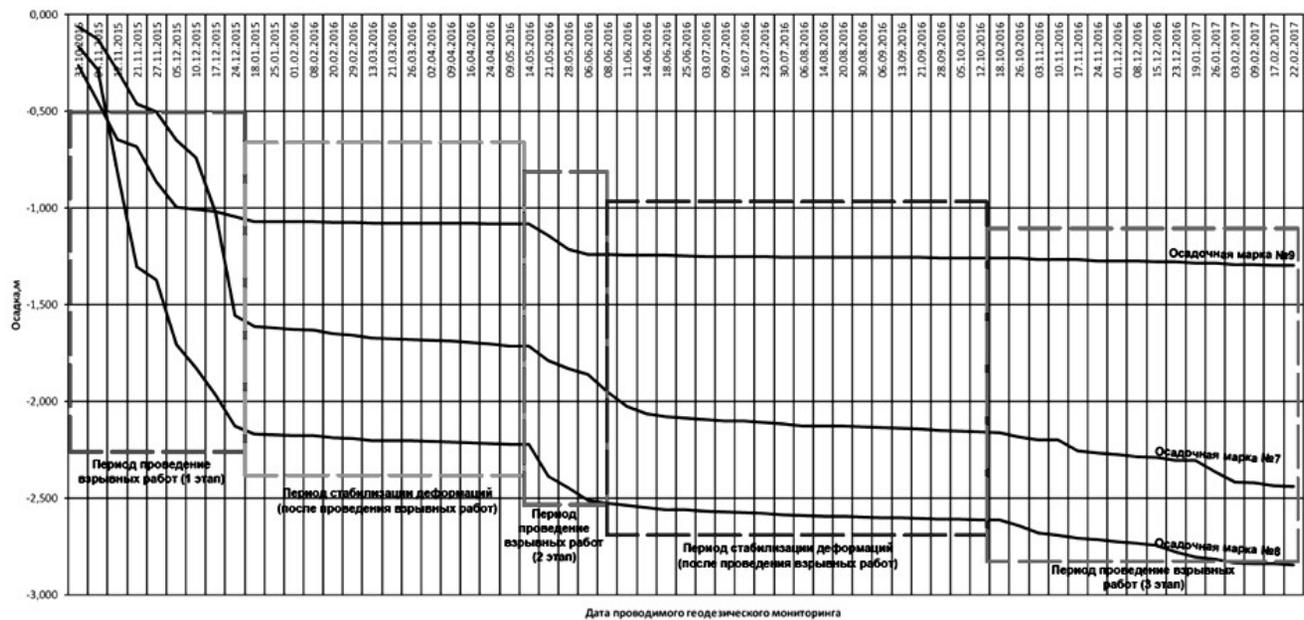


Рис. 6. Результаты наблюдений за деформацией грунтовых реперов.

рость осадки приравняется к периоду стабилизации.

Геодезические наблюдения подтвердили эффективность работы, на участке производства работ было достигнуто равновесие между нагрузками от веса насыпи и несущей способностью основания.

На рисунке 7 представлена область накопленных вертикальных деформаций по наблюдениям за грунтовыми марками на протяжении всего периода работы. На участке, где ранее протекала река, наблюдаются максимальные осадки по отношению к первоначальным значениям.

Целью выполненных геофизических исследований являлась качественная оценка степени уплотнения грунтов в основании насыпи по технологии стабилизации основания с использованием энергии взрыва на основании изменений физических параметров — скоростей распространения упругих волн.

Профиль 1, по которому построены сейсмографические разрезы, представляет собой сечение, расположенное на 24 м правее и параллельно оси земляного полотна по направлению Москва — Санкт-Петербург.

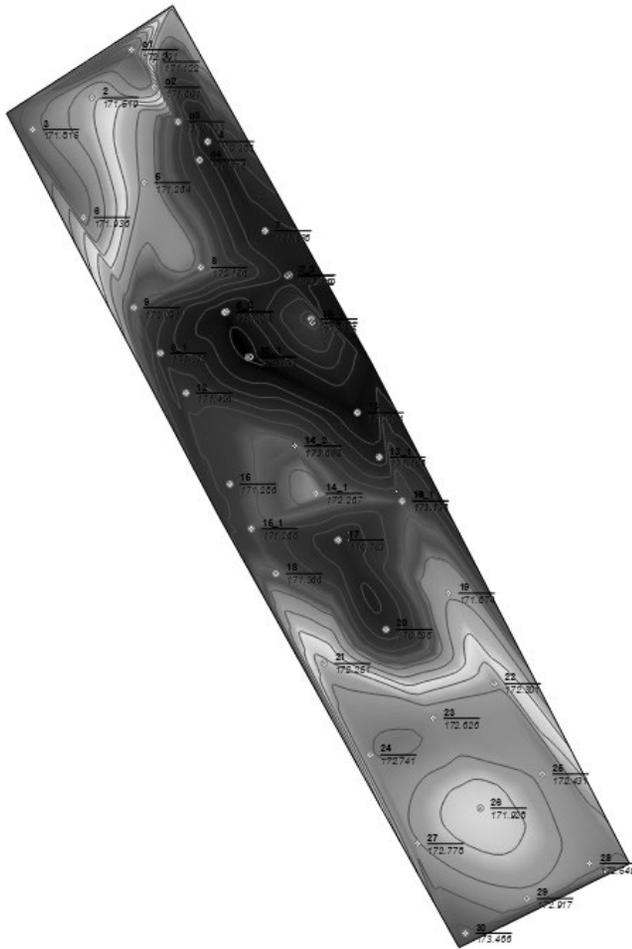


Рис. 7. Область накопленных вертикальных деформаций участка после производства работ: светлый — 0 мм, черный — 2500 мм.

Скоростные разрезы по результатам сейсморазведочных работ протяженностью 240 м характеризуют пространственное распределение скоростей упругих S-волн (рисунок 8) и P-волн (рисунок 9) по глубине. Анализ разрезов показал, что скорость распространения P-волн определяется составом и влажностью грунтов, а на скорость распространения S-волн влажность практически не влияет, зато влияет изменение плотности их сложения. Поскольку состав грунтов на различных этапах исследований практически не менялся, на основании представленных разрезов можно качественно оценить степень уплотнения грунтов под действием энергии взрыва.

Сопоставление скоростных разрезов на первом, втором и третьем этапах показывает, что в разрезах произошли изменения как в характере, так и в значениях распределения скоростей.

Сопоставление изменений, наблюдаемых на сейсмотомографических P-волн и S-волн позволяет сделать на качественном уровне вывод о том, что проведение взрывных работ приводит, в первую очередь, к перераспределению частиц грунта

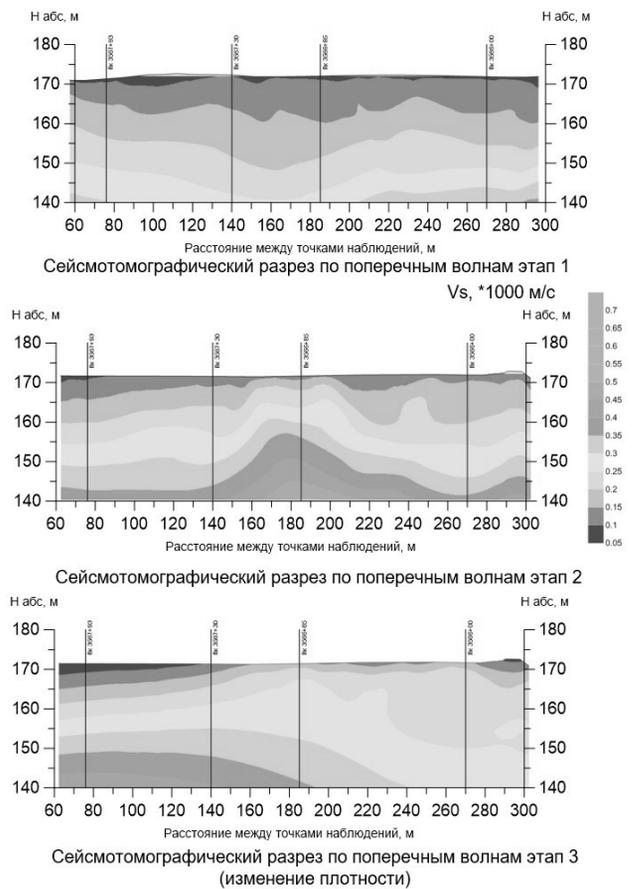


Рис. 8. Сейсмотомографические разрезы по поперечным волнам (S-волнам), построенные по результатам первого, второго и третьего этапов производства работ, согласно профилю 1.

и уплотнению основания насыпи в пределах интервалов разрезов, контролируемых увеличением скоростей S-волн. Изменение влажностного режима грунтов вторично и заметно проявляется после второй стадии взрывных работ.

Различия в распределении значений скоростей сейсмических волн обусловлены в первую очередь изменениями влажности и плотности грунтов. После проведения взрывных работ на некоторых интервалах разрезов, обработанных взрывами, наблюдалось увеличение скоростей P-волн и S-волн, свидетельствующее о произошедшем уплотнении грунтов и уменьшении их влажности.

Таким образом, комплексные исследования на участке мостового перехода через р. Коломенка с целью обоснования возведения подходной насыпи позволили детально изучить инженерно-геологический разрез и выявить наиболее точное положение кровли прочных пород основания, а также определить глубины залегания структурно-неустойчивых грунтов.

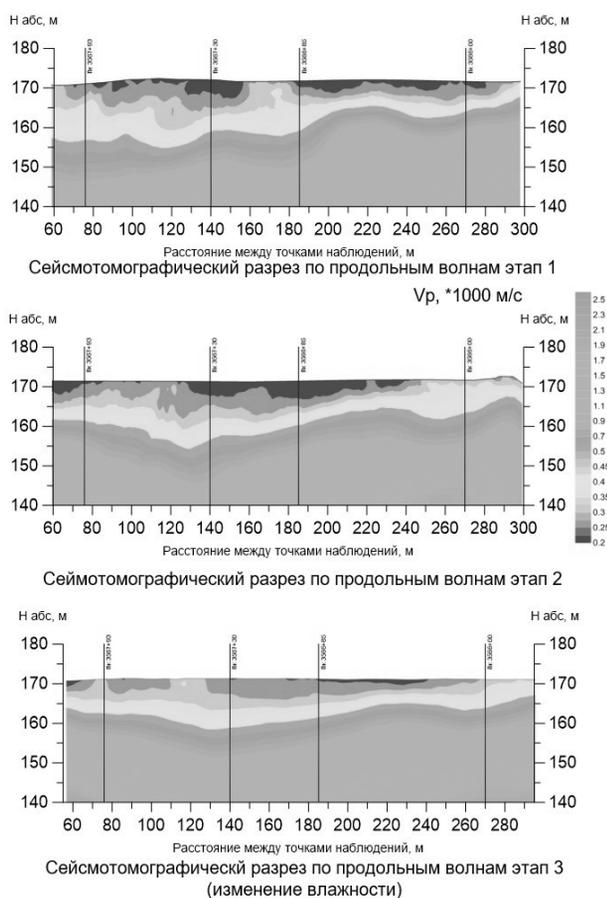


Рис. 9. Сейсмотомографические разрезы по продольным волнам (Р-волнам), построенные по результатам первого, второго и третьего этапов производства работ, согласно профилю 1.

На основе оценки физико-механических свойств грунтов были сделаны выводы о невозможности их использования без улучшения строительных свойств: уплотнения рыхлых насыщенных водой песков, упрочнения органических и слабых глинистых грунтов. Также встал вопрос о выборе способа для этих целей, в качестве которого для стабилизации насыпи на водонасыщенных несвязных грунтах была применена технология по усилению слабой толщи под основанием дорожной насыпи и по уплотнению песка дорожного полотна, сопровождающаяся созданием вертикальных песчаных дрен с использованием энергии взрыва.

Оценка эффективности проведённых работ с использованием энергии взрыва свидетельствует о стабилизации толщи слабых грунтов и об уплотнении песчаных грунтов основания дорожной насыпи, чем обеспечивается прочность и устойчивость основания, что подтверждают результаты статического зондирования, интерпретации геодезических наблюдений и комплексных геофизических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абелев М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. — М.: Стройиздат, 1983. 247 с.
2. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000 Серия Московская Лист О-36-XXIII Недра, 1977 г.
3. Гидрогеология СССР. Том.1. Московская и смежные области. Издательство «Недра». Москва, 1966. 423 с.
4. Инженерная геология СССР. В 8-ми томах. Т. 1. Русская платформа. М., Изд-во Моск. ун-та, 1978. 528 с.;
5. Глазунов В. В., Городнова Е. В., Ефимова Н. Н., Куликов А. И., Куликова Н. В., Татарский А. Ю. Геофизический мониторинг изменений состояния грунтового основания автомобильной дороги при стабилизации грунтов с использованием энергии взрыва. Инженерная и рудная геофизика 2018-Алмааты, Казахстан, 23–27 апреля 2018. С. 22–29.
6. Городнова Е. В., Минченко А. А., Суворова Е. А. Исследование плотности сложения песчаных грунтов в основании дорожной насыпи в процессе ее уплотнения взрывами удлиненных зарядов. Известия Петербургского университета Путей сообщения. № 3. 2018. С. 371–379.
7. Иванов, П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений: учеб. для гидротехн. спец. вузов / П. Л. Иванов. — М.: Высшая школа, 1985. — 352 с.
8. Иванов, П. Л. Уплотнение малосвязных грунтов взрывами/П. Л. Иванов. — М.: Недра, 1983. — 230 с.
9. Имилек Р. Уплотнение и дренирование слабых водонасыщенных грунтов взрывами удлиненных зарядов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.02 / Санкт-Петербургский гос. техн. ун-т. — Санкт-Петербург, 1992. — 16 с.
10. Минаев О. П. Основы и методы уплотнения

- грунтов оснований для возведения здания и сооружений. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург — 2017.
11. Улицкий В. М., Городнова Е. В. Стабилизация грунтов при строительстве железных и автомобильных дорог микровзрывами // Сб. трудов III Междунар. научно-техн. конф. ФГБОУ ВПО ПГУПС «Применение геоматериалов при строительстве и реконструкции транспортных объектов». — СПб., 2013. — С. 56–57.
 12. Улицкий В. М., Имиолек Р., Городнова Е. В., Шашкин М. А. Стабилизация грунтов в основаниях дорожных сооружений по технологии микровзрывов // Дороги. Инновации в строительстве. — 2013. — № 30. — С. 95–96.
 13. Улицкий В. М., Шашкин М. А., Городнова Е. В., Sikora Z., Wyrosiak M. Усиление слабых грунтов оснований дорожных сооружений // Сб. трудов междунар. научно-техн. конф. «Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение» посвященной 80-летию образования кафедры Геотехники СПбГАСУ и 290-летию Российской науки. — СПб., 2014. — Часть I. — С. 101–109.
 14. Флорин В. А. Явления разжижения и способы уплотнения рыхлых водонасыщенных оснований. Известия АН СССР, О. Т.Н., № 6, 1952.
 15. Способ преобразования строительных свойств малосвязанных обводненных грунтов взрывами зарядов взрывчатого вещества — патент на изобретение № 2635421. Заявка № 2016142965 приоритет от 31.10.2016 г. Опубликовано 13.11.2017 Бюл. № 32. Кантор В. Х., Жуликов В. В., Щеткин К. А., Аверьянов В. И., Улицкий В. М., Городнова Е. В.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. **Ахманов Григорий Георгиевич**, кандидат геолого-минералогических наук, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, доцент
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, тел. +7 (495) 939 32 60
akhmanov@geol.msu.ru
2. **Бахматова Ксения Арнольдовна**, кандидат сельскохозяйственных наук, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра биогеографии и охраны природы, доцент
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 10-я линия В. О., д. 31-33, тел. +7 (812) 323 85 51
k.bahmatova@spbu.ru
3. **Вознесенский Евгений Арнольдович**, доктор геолого-минералогических наук, директор Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова
Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2
eugene@geol.msu.ru
4. **Гладченко Марина Анатольевна**, кандидат технических наук, кафедра химической энзимологии химического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, старший научный сотрудник
Россия, 119992, г. Москва, Ленинские горы, д.116, тел. +7 (495) 939 50 83
gladmarina@yandex.ru
5. **Городнова Елена Владимировна**, кандидат технических наук, кафедра строительства дорог транспортного комплекса Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», доцент
Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. +7 (812) 457 89 27, факс: (812) 457 89 27
elena.gorodnova@mail.ru
6. **Григорьева Ия Юрьевна**, кандидат геолого-минералогических наук, кафедра инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, доцент
Россия, 119191, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, тел. +7 (495) 939 15 22
ikagrig@inbox.ru
7. **Егорова София Александровна**, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, студентка
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 10-я линия В. О., д. 31-33, тел. +7 (812) 323 85 51
st075978@student.spbu.ru
8. **Ионов Всеволод Юрьевич**, кандидат геолого-минералогических наук, ПАО «НОВАТЭК», эксперт
Россия, 119415, г. Москва, ул. Удальцова, д. 2, тел. +7 962 997 15 50
sevaionov@gmail.com

9. **Казеев Андрей Игоревич**, кандидат геолого-минералогических наук, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, ведущий научный сотрудник
Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2 (а/я 145 ИГЭ РАН)
kazeev@yandex.ru
10. **Корвет Надежда Григорьевна**, кандидат геолого-минералогических наук, кафедра геоэкологии, природопользования и экологической безопасности ФГБОУ ВО «Российского государственного гидрометеорологического университета», доцент
192007, Россия, г. Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79; тел. +7 (812) 372 50 92, факс: (812) 712 80 77
nncorvet2010@yandex.ru
11. **Кучуков Марат Мухамедович**, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, ведущий научный сотрудник
Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2 (а/я 145 ИГЭ РАН)
kuchukov.m@gubkin.ru
12. **Миронюк Сергей Григорьевич**, кандидат геолого-минералогических наук, геологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, старший научный сотрудник
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, тел. +7 916 246 75 71
mironyuksg@gmail.com
13. **Морозов Андрей Васильевич**, магистр геологии, кафедра инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, аспирант
Россия, 119191, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, тел. +7 (495) 939 15 22
morozov8pro@yandex.ru
14. **Никитин Михаил Сергеевич**, лаборатория исследования влияния геологических факторов на физико-химическое закрепление грунтов геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, старший научный сотрудник
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, тел. +7 (495) 939 23 70
NikitinMS@geol.msu.ru
15. **Николаева Татьяна Николаевна**, кандидат геолого-минералогических наук, кафедра гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета, доцент
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, тел. +7 (812) 328 84 90
Nikolaeva_TN@pers.spmi.ru
16. **Норова Лариса Павловна**, кандидат геолого-минералогических наук, кафедра гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета, доцент
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, тел. +7 (812) 328 84 90
Norova_LP@pers.spmi.ru; larisatorova@rambler.ru
17. **Панова Елена Геннадьевна**, доктор геолого-минералогических наук, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра геохимии, профессор
Россия, 1991555, г. Санкт-Петербург, пер. Декабристов, д. 16, тел. +7 (812) 363 62 21
e.panova@spbu.ru
18. **Петрова Елизавета Владимировна**, геологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, студентка
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, тел. +7 918 333 81 22
elizavetapetrova004@gmail.com

19. **Постоев Герман Павлович**, доктор технических наук, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, главный научный сотрудник
Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2 (а/я 145 ИГЭ РАН), тел. +7 (495) 607 46 23
opolzen@geoenv.ru
20. **Сенцова Екатерина Алексеевна**, кафедра инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, инженер
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, тел. +7 926 032 73 34
sentsovaea@gmail.com
21. **Соломин Глеб Владимирович**, геологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, студент
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, тел. +7 981 781 27 62
glebacs@mail.ru
22. **Суворова Екатерина Андреевна**, заведующая лабораторией кафедры основания и фундаменты Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», инженер
Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. +7 (812) 314 90 13, факс: (812) 314 90 13
suvorova_e_a@mail.ru
23. **Шешукова Анастасия Анатольевна**, кандидат сельскохозяйственных наук, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра почвоведения и экологии почв, старший преподаватель
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 16-я линия В. О., д. 29, тел. +7 (812) 321 33 62
a.sheshukova@spbu.ru

Сдано в набор: 21.12.2022 Подписано в печать: 26.12.2022 Формат бумаги: 60x88 1/8
Цифровая печать. Тираж 50 экз.

Учредитель: Охотинское общество грунтоведов

Отпечатано в типографии «СВЕН»

