



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Выпуск 26

Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий
ресурс общества

Материалы годичной сессии
Научного совета РАН по проблемам геоэкологии,
инженерной геологии и гидрогеологии
(27-28 марта 2025 г.)

Москва
Издательство «Геоинфо»
2025

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и
гидрогеологии

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН

Российская национальная группа МАИГ

Российский университет транспорта (МИИТ)

ТК 418 «Дорожное хозяйство» Росстандарта

при поддержке

Федерального дорожного агентства (Росавтодор)

СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества

Выпуск 26

**Материалы годичной сессии
Научного совета РАН по проблемам геоэкологии,
инженерной геологии и гидрогеологии
(27-28 марта 2025 г.)**



Москва
Издательство «Геоинфо»
2025

ББК 26.3
С 32
УДК 624.131.: 551.3.

Сергеевские чтения. Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества. Выпуск 26. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (27-28 марта 2025 г.). Москва: Издательство «Геоинфо», 2025. - 282 стр.

ISBN 978-5-6051759-6-4

В сборнике опубликованы доклады, представленные на двадцать шестую ежегодную конференцию «Сергеевские чтения» памяти академика Е.М. Сергеева – выездную сессию Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, организованную в г. Пскове при участии Российской национальной группы МАИГ, Российского университета транспорта (МИИТ), ТК-418 «Дорожное хозяйство» Росстандрата и при поддержке Федерального дорожного агентства (Росавтодор), 27-28 марта 2025 г. Чтения были посвящены обсуждению фундаментальных и прикладных вопросов изучения массивов грунтов. В соответствии с обсуждавшимися на конференции темами, сборник состоит из следующих разделов: закономерности взаимодействия массивов грунтов с объектами инженерной деятельности человека; моделирование как инструмент изучения массивов грунтов и развивающихся в них процессов; прогноз динамики поведения массивов грунтов – постановка задач и методы их решения; экологические аспекты изучения массивов грунтов; вопросы взаимодействия сооружений автомобильных дорог с массивами грунтов в криолитозоне; сохранение состояния оснований исторических объектов и закрепление грунтов. Для специалистов, студентов и аспирантов в области инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии.

Редакционная коллегия:

В.И. Осипов (главный редактор), Е.А. Вознесенский (зам. главного редактора), Е.В. Булдакова, (отв.секретарь), Ф.К. Буфеев, О.Н. Еремина, Ф.С. Карпенко, П.С. Микляев, Г.П. Постоев, Д.О. Сергеев.

© Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, 2025

© Изд-во «ГеоИнфо», 2025



Академик
Евгений Михайлович СЕРГЕЕВ
(1914 – 1997)

ВВЕДЕНИЕ

В сборнике представлено основное содержание научных докладов конференции «Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества» в рамках XXVI Сергеевских чтений. Эта конференция призвана привлечь внимание исследователей в области наук о Земле к тому важному факту, что среда обитания человеческого общества в значительной мере представлена именно массивами грунтов: на них или в них размещены сооружения, в них располагаются верхние горизонты подземных вод, защита которых обеспечивается самими грунтами, на них существует вся растительность, через них идут восходящие потоки газов из недр, в них же человек сваливает побочные продукты любой своей деятельности. Именно массивы грунтов в значительной мере – а на плотно освоенных территориях практически полностью – берут на себя реализацию экологических функций литосферы – ресурсной, геохимической, геодинамической и геофизической. И через этот экологический атрибут своего существования массивы грунтов включаются в объектную базу исследований в геоэкологии – науки о взаимодействии всех косных оболочек Земли в связи с их влиянием на живое – на биосферу. При этом каждая из оболочек – литосфера, гидросфера, атмосфера с их подоболочками – исследуется «своими» отдельными науками.

Массивы грунтов – это и геохимические барьеры нашей среды обитания. В конечном итоге все, что более не нужно человеческому обществу, за исключением космического мусора погружается на вечное «хранение» в массивы грунтов. Именно массивы отвечают за то, чтобы захороненные или образованные при трансформации исходных веществ токсичные элементы и соединения не могли нанести вред биоте. И представляется, что к ресурсной экологической функции массива грунтов следует отнести и его защитный по отношению к биоте ресурс – как «ёмкости накопления», например, токсикантов или даже собственных деформаций под сооружением. Это взаимодействие оболочек Земли сегодня в значительной мере модулируется техногенезом – ведь массив грунтов сам по себе – по его определению – в некотором смысле продукт техногенеза, определяющего и его границы. Более того, техногенез видоизменяет и массивы грунтов, и даже создает новые антропогенные толщи. Кроме того, природа поведения массива грунтов – важнейшая научная проблема и инженерной геологии, и геоэкологии, что обусловлено неопределенностью границ массива грунтов в пространстве, невозможностью прямого наблюдения за процессами, происходящими в массивах грунтов, плохо представляемой неоднородностью свойств массива грунтов и, наконец, неопределенностью соотношения состояния образца грунта и того же грунта в массиве.

Эти размышления об изучении массивов определили и рубрикации докладов на конференции, в соответствии с которой построен данный сборник. В рамках соответствующих секций будут последовательно рассмотрены поставленные выше вопросы: 1) закономерности взаимодействия массивов грунтов с объектами инженерной деятельности человека; 2) моделирование как инструмент изучения массивов грунтов и развивающихся в них процессов; 3) прогноз динамики поведения массивов грунтов, постановка задач и методы их решения и 4) экологические аспекты изучения массивов грунтов. Кроме того, учитывая чрезвычайно высокую актуальность изучения массивов грунтов с целью обеспечения логистической связанности огромной территории России, в отдельную секцию вынесены вопросы взаимодействия сооружений автомобильных дорог с массивами грунтов в криолитозоне. Ну и наконец, проводя конференцию на Псковской земле с ее богатой историей, нельзя было не рассмотреть научную сторону задач сохранения состояния массивов грунтов оснований исторических памятников и вопросы закрепления грунтов.

В итоге вниманию читателей сборника предлагается 58 научных сообщений, большая часть которых будет представлена в виде устных докладов на конференции. Организаторы конференции надеются, что и сами доклады, и их живое обсуждение будут способствовать преодолению научной проблемы понимания природы поведения массивов грунтов.

*Со-председатель Оргкомитета
Е.А. Вознесенский*

О РАБОТЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ДОРОЖНОГО АГЕНТСТВА ПО АДАПТАЦИИ ДОРОЖНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА НА ФЕДЕРАЛЬНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ, ПРОХОДЯЩИХ ПО ТЕРРИТОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В ПРЕДЕЛАХ КРИОЛИТОЗОНЫ

С.В. Гошовец

Управление научно-технических исследований, информационных технологий и хозяйственного обеспечения
Федерального дорожного агентства, 129085, г. Москва, ул. Бочкова, 4
E-mail: rad@fda.gov.ru

Вечная мерзлота занимает порядка 65% территории России. Причем эти районы крайне важны для нашей страны в экономическом и стратегическом плане. По данным многолетних наблюдений, выполняемых Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, среднегодовая температура воздуха у поверхности Земли на территории Российской Федерации с середины 1970-х годов растет в среднем на 0,51°C за 10 лет (темп роста температуры увеличился на 0,04°C по сравнению с 2019 годом), что в 2,8 раза превышает темпы роста средней глобальной температуры воздуха (0,18°C за 10 лет). При этом темп роста среднегодовой температуры воздуха в Арктической зоне Российской Федерации в 3,9 раза превышает темпы роста средней глобальной температуры воздуха (0,71°C за 10 лет). Площадь, занятая приповерхностной многолетней мерзлотой на территории Российской Федерации, по сравнению с началом XXI века может сократиться в зависимости от сценариев на 15 - 38 процентов к середине века и на 25 - 92 процентов к концу века [1].

Такая динамика средней глобальной температуры воздуха способствует деградации верхних слоев многолетнемерзлых грунтов в основании дорожных конструкций и других объектов инфраструктуры, которые приводят к развитию недопустимых деформаций и частичному разрушению объектов в зоне распространения многолетней (вечной) мерзлоты. При этом текущий опыт строительства и ремонта федеральных автомобильных дорог А-331 «Виллой», Р-504 «Колыма», А-360 «Лена», Р-297 «Амур» показывает, что применяемые общие технические наработки [2 - 8] уже не в полной мере позволяют обеспечить долговечность и надежность конструкций с учетом динамики изменения климатических и геокриологических условий. Поэтому прогнозирование изменения температуры, влажности и других характеристик грунтов в условиях многолетней (вечной) мерзлоты позволит разработать рациональные конструкции объектов инфраструктуры и материалы с увеличенным сроком службы.

Правительством Российской Федерации разработана государственная система мер [1, 9] политического, законодательного, нормативно-правового, экономического и социального характера, которые осуществляются федеральными органами исполнительной власти и органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, и которые направлены на уменьшение уязвимости системы обеспечения национальной безопасности страны, субъектов экономики и граждан.

В целях повышения безопасности дорожного движения, надежности дорожных конструкций и эффективности расходования бюджетных средств Федеральным дорожным агентством в 2021 году утвержден «План мероприятий («дорожная карта») по организации мониторинга состояния участков автомобильных дорог общего пользования федерального значения, проходящих по территории распространения многолетнемерзлых грунтов криолитозоны для адаптации к изменениям климата» [10], который включен Минтранс России в отраслевой план адаптации к изменениям климата [11].

К научным исследованиям в рамках реализации мероприятий дорожной карты привлечены Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской Академии наук, Автономная некоммерческая организация «Научно-исследовательский институт транспорт-

но-строительного комплекса» (АНО «НИИ ТСК»), Ассоциация производителей и потребителей асфальтобетонных смесей «Р.О.С.АСФАЛБТ», а также федеральные казенные учреждения, подведомственные Росавтодору. Также заключено соглашение между Росавтодором и Правительством Ямало-Ненецкого автономного округа о сотрудничестве по вопросам совместного изучения Арктики в сфере деятельности по развитию транспортной инфраструктуры и создана совместная рабочая группа Росавтодора и ОАО «РЖД» по обеспечению требований эксплуатационного состояния линейных сооружений в зоне вечной мерзлоты.

Одним из ключевых мероприятий дорожной карты является создание системы контроля инженерно-геокриологических условий, которая включает мониторинговые стационарные посты, размещаемые на ключевых участках автомобильных дорог в различных инженерно-геокриологических условиях.

Организационная часть этой работы достаточно сложна, потому что связана с синхронным выполнением научных исследований, определением единых требований к оборудованию и созданием опытных стационарных мониторинговых постов, и потребовала четкого взаимодействия научных организаций и федеральных казенных учреждений, подведомственных Росавтодору, за которыми на праве оперативного управления закреплены федеральные автомобильные дороги А-331 «Виллой», Р-504 «Колыма», А-360 «Лена», Р-297 «Амур». Исследования выполнялись в несколько этапов:

1. в ходе 1 этапа выполнены сбор и анализ геокриологических условий прохождения федеральных автомобильных дорог А-331 «Виллой», Р-504 «Колыма», А-360 «Лена» и Р-297 «Амур» (далее – автомобильные дороги). Определены приоритетные участки автомобильных дорог, на которых процессы развития деформаций имеют наиболее очевидный характер и на которых наблюдения позволят получить максимальный объем научно-технической информации и выйти на обоснованные рекомендации по мероприятиям, препятствующим развитию деформаций. Составлена программа исследований;

2. в ходе 2 этапа работ проведено геокриологическое районирование территорий размещения выделенных участков автомобильных дорог с использованием данных дистанционного зондирования Земли и материалов инженерно-геологических исследований, проведенных ранее. Разработаны порядок организации наблюдений за состоянием массивов многолетнемерзлых грунтов при мониторинге, требования к точности и пределам погрешности измеряемых параметров и перечень необходимого оборудования, применяемого на постах мониторинга, предложения по общей структуре базы данных и форматам передачи информации. Параллельно при сопровождении Российской академии наук велось строительство опытных стационарных мониторинговых постов (стационарные мониторинговые посты - это высокотехнологичные объекты, размещаемые на автомобильных дорогах и позволяющие получать массив данных с порядка 30 контролируемых параметров, которые разделены на 3 блока: инженерно-геокриологический блок, включающий в себя инженерно-геологические, гидрогеологические, геокриологические наблюдения и исследования; гидрометеорологический блок, включающий наблюдения за изменением метеорологических факторов, мониторинг напряженно-деформируемого и водно-теплового режима дорожных одежд;

3. в ходе последующих этапов разработаны Методические рекомендации, предусматривающие перечень необходимых контролируемых при мониторинге параметров, рекомендации по оборудованию режимных наблюдательных постов на ключевых участках автомобильных дорог в криолитозоне, рекомендации по выбору мест размещения наблюдательных постов в полосе отвода автодороги, рекомендации по использованию ДЗЗ в целях геокриологического и геотехнического мониторинга участков автомобильных дорог в криолитозоне, рекомендации по сбору, накоплению и анализу поступающей при мониторинге информации с целью ее использования в инженерных расчетах и прогнозе эксплуатационного состояния автомобильных дорог.

Таким образом, в кратчайшие сроки завершена разработка отраслевого методического документа [12], устанавливающего требования к оснащению, устройству и организации работы стационарных мониторинговых постов (далее – Методические рекомендации). В 2023 году в соответствии с Методическими рекомендациями завершено создание 7 стационарных мониторинговых постов.

В настоящее время на них ведется сбор, накопление и анализ научно-технической информации (изменение водно-теплового режима, развитие процессов в полосе отвода, динамики ряда параметров на ранней стадии их развития, микродеформации дорожной одежды и др.). Получаемые научные данные позволят в дальнейшем обеспечить оценку и прогноз состояния и свойств се-

зонно-талых и многолетнемерзлых пород, а также оценку и прогноз динамики опасных геокриологических процессов, таких как проседания поверхности, деформации земляного полотна, склоновые явления и другие, на значительных по площади территориях, разработать и применить превентивные мероприятия для корректировки и поддержания мерзлотно-грунтовых условий дороги.

Еще одной знаковой работой является проведенное в 2024 году научное исследование по оценке геокриологических процессов на автомобильной дороге Р-297 «Амур» по материалам дистанционных съемок с созданием схемы характерных ландшафтных и геокриологических изменений.

В ходе исследования выполнено дешифрирование материалов дистанционных съемок для получения информации о ландшафтных и геокриологических условиях, а также о развитии геокриологических процессов в полосе автомобильной дороги Р-297 «Амур» (км 380 – км 678, км 756 – км 1325), анализ ландшафтных и инженерно-геокриологических условий и их оценка по участкам территории. Результат отражен, прежде всего, в схеме ландшафтных и геокриологических условий полосы автомобильной дороги Р-297 «Амур» в масштабе 1:100 000. На ней показаны территории с различными ландшафтно-геокриологическими условиями с оценкой их предрасположенности к развитию негативных геокриологических процессов и участки полосы трассы, непосредственно прилегающей к автодороге с оценкой степени опасности и характерным набором геокриологических процессов.

Уникальность исследования заключается в том, что в кратчайшие сроки проведен анализ значительных по площади территорий. В итоге выделено 328 участков с различной оценкой степени опасности общей длиной 867 км, охарактеризованные по набору геокриологических процессов и явлений и ранжированные по степени опасности. Полученный результат учтен федеральными казенными учреждениями, подведомственными Росавтодору, при планировании дорожных работ, а также позволит при проектировании выбрать участки для более углубленного изучения со значительным участием наземных методов для решения задач мониторинга.

Нельзя не отметить научное исследование, исполненное в 2024 году Академией дорожного хозяйства Российского университета транспорта (МИИТ) с привлечением специалистов из институтов Российской академии наук (РАН) и Томского государственного архитектурно-строительного университета (ТГАСУ), выполненное в рамках государственной программы поддержки университетов «Приоритет-2030» и направленное на разработку подхода к дорожно-климатическому районированию в зоне вечной мерзлоты в первой дорожно-климатической зоне. Данная работа, являющаяся первым шагом к актуализации и детализации дорожно-климатического районирования с использованием современных достижений климатологии, геокриологии и инженерной геологии, получила высокую оценку на научно-техническом совете Росавтодора и будет использована в дальнейшей работе по данному направлению.

Успешная реализация масштабных мероприятий по реализации дорожной карты невозможна без личного внимания к этой работе со стороны руководства Федерального дорожного агентства. Одним из знаковых событий в 2024 году стала проведенная в г. Благовещенске научно-практическая конференция «Осуществление дорожной деятельности в зоне вечной мерзлоты», состоявшаяся в рамках рабочей поездки руководителя Федерального дорожного агентства Р.В. Новикова в Дальневосточный федеральный округ.

В результате актуализированы задачи по дальнейшей работе Росавтодора, направленной на адаптацию дорожной деятельности к изменениям климата на автомобильных дорогах, проходящих по территории распространения многолетнемерзлых грунтов криолитозоны. Среди основных задач Росавтодора на 2025 год:

1. проведение научно-исследовательских работ, результатом которых станут отраслевые методические рекомендации по теплотехническому расчету дорожных конструкций, требования к организации и проведению научно-технического сопровождения инженерных изысканий, проектирования и строительства автомобильных дорог, правила проектирования автомобильных дорог в I дорожно-климатической зоне;

2. масштабирование научных исследований по оценке геокриологических процессов по материалам дистанционных съемок с созданием схемы характерных ландшафтных и геокриологических изменений на автомобильные дороги А-331 «Виллой», Р-504 «Колыма», А-360 «Лена» с разработкой отраслевых методических рекомендаций;

3. организация мониторинга экспериментальных технических решений, внедряемых федеральными казенными учреждениями, подведомственными Росавтодору, на автомобильных дорогах, проходящих по территории распространения многолетнемерзлых грунтов криолитозоны.

В заключении необходимо отметить, что за последние годы Федеральным дорожным агентством развернуты комплексные научно-исследовательские работы, направленные на решение задачи повышения срока службы автомобильных дорог в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.

Основой успешного выполнения намеченных мероприятий является тесное взаимодействие между производственными организациями, отраслевой наукой и институтами РАН.

Литература

1. *Распоряжение Правительства РФ от 11.03.2023 N 559-р «Об утверждении национального плана мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года»*
2. *Инженерное мерзлотоведение : учеб. пособие / Г.И. Кузнецов, Н.В. Крук. – Красноярск: Сиб. Федер. Ун-т, 2019. – 140 с.*
3. *СП 445.1325800.2023 «Водопропускные трубы и системы водоотвода в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования» (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 09.01.2024 N 3/пр)*
4. *СП 313.1325800.2017 «Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства» (утв. и введен в действие приказом Минстроя России от 14.12.2017 N 1669/пр)*
5. *Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации искусственных сооружений автомобильных дорог на водотоках с наледями/ Минавтодор РСФСР. М.: Транспорт, 1989.*
6. *Рекомендации по изысканиям, проектированию и строительству малых искусственных сооружений на водотоках с процессами наледообразования / Минтрансстрой, М.: ЦНИИС, 1968. – 66 с.*
7. *ВСН 84-89 Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты. Минтрансстрой РСФСР - М.: Стройиздат, 1990. – 177 с.*
8. *Методические рекомендации по проектированию и строительству земляного полотна в зоне вечной мерзлоты с использованием разрыхленных мерзлых грунтов, сохраняемых в мерзлом состоянии во время эксплуатации (для опытно-экспериментального строительства). М.: ФГУП Информавтодор, 2003. – 32 с.*
9. *Распоряжение Правительства РФ от 25.12.2019 N 3183-р «Об утверждении национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года»*
10. *Распоряжение Федерального дорожного агентства от 30.04.2021 № 1759-р «Об утверждении плана мероприятий («дорожная карта») по организации мониторинга состояния участков автомобильных дорог общего пользования федерального значения, проходящих по территории распространения многолетнемерзлых грунтов в пределах криолитозоны, в целях адаптации к изменениям климата»*
11. *Приказ Минтранса России от 02.03.2022 № 69 «Об утверждении Плана адаптации к изменениям климата в области транспорта»*
12. *ОДМ 218.11.007-202 «Методические рекомендации по организации инженерно-геокриологического мониторинга и оборудованию инженерно-геокриологических мониторинговых стационарных постов в полосе отвода автомобильных дорог в криолитозоне» (издан на основании распоряжения Росавтодора от 22.02.2023 № 366-р)*

О МАССИВАХ ГРУНТОВ И ИХ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ФУНКЦИЯХ

В.Т. Трофимов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
E-mail: trofimov@rector.msu.ru

Понятие «массив» широко используется в геологических науках. Используется оно и в инженерной геологии, в том числе в виде словосочетаний «массив грунтов», «массив горных пород», «инженерно-геологический массив» и др. Соотношение названных понятий рассмотрено автором в седьмой части учебника «Грунтоведение», опубликованного в 2005 г. Там также охарактеризовано их соотношение с содержанием понятия «грунтовая толща», а понятие «инженерно-геологическая структура» даже не упоминается. В итоге многие позиции этого вопроса не получили до сих пор однозначной трактовки. В связи с этим остановлюсь на обсуждение двух позиций: 1) о содержании понятия «массив грунтов» и 2) о его жизнеобеспечивающих функциях. Обе эти позиции вынесены в название настоящих, двадцать шестых Сергеевских чтений.

Первая позиция. В инженерно-геологической литературе уже давно *четко обособились два принципиально различных подхода к рассмотрению содержания понятия «массив горных пород».* Представители первого (Л.Д. Белый, Г.А. Голодковская, М. Матула, Л.В. Шаумян и др.) *рассматривали его содержание вне конкретной связи с инженерным сооружением.* Странники второго направления (П.Н. Панюков, Г.А. Марков, Л. Мюллер, М.В. Рац и др.), *наоборот, увязывали содержание и объем понятия «массив горных пород» со сферой воздействия инженерного сооружения.*

Содержание рассматриваемого понятия, отвечающее взглядам сторонников **первого из отмеченных подходов**, наиболее четко сформулировали Г.А. Голодковская и Л.В. Шаумян (1974): «Под массивами скальных горных пород¹ понимают геологическое тело, образующее геологическую структуру или часть ее, сформировавшееся в определенной геолого-структурной и палеогеографической обстановке и характеризующееся присущими только ему геологическими, гидрогеологическими и инженерно-геологическими закономерностями». Четко видно, что массив определяется как объективно существующее естественное геологическое тело, независимо от того, находится оно во взаимодействии с инженерным сооружением или последнее отсутствует. Это аргументируется следующими положениями: 1) в строении массивов, представленных совокупностью разных горных пород или одной горной породой, наблюдаются различные по размерам компоненты, диапазон изменения которых непостоянен и не зависит от инженерных задач, обусловленных конкретным видом строительства, а определяются геологической природой этого массива как физического тела; 2) массив горных пород может всесторонне изучаться и до того, как возник инженерный замысел о возведении в данном месте того или иного сооружения; 3) массив горных пород везде и всегда прежде всего геологический объект, представляющий собой систему с определенным соотношением элементов. Они инвариантны, т.е. сохраняются в системе практически постоянно, и требуют тщательного геологического изучения.

Все эти аргументы справедливы, однако такой подход может быть оправдан лишь на первом этапе изучения объекта. Не имея данных о планируемом объекте, невозможно четко судить ни о размерах массива, ни о задачах и глубине его изучения, что необходимо на последующих этапах работ, при проведении инженерно-геологических изысканий.

По-иному определяли рассматриваемое понятие сторонники **второго подхода**. П.Н. Панюков (1962 г.) писал, что массив горных пород – это часть земной коры, находящаяся в сфере инженерного воздействия, исследуемая с целью определения условий производства инженерных работ и эксплуатации сооружений и обладающая инженерно-геологической структурой, отличной от структуры соседних с ним участков земной коры, Л. Мюллер (1971 г.) подчеркивал, что под «горным массивом следует подразумевать не географическую или тектоническую единицы, а, согласно разговорной терминологии горняков, строителей тоннелей и др., ту горную породу, в которой производятся ра-

¹ Следует писать – скальных грунтов (авт.).

боть». М.В. Рац предлагал понимать под массивом горных пород «связную область земной коры, соизмеримую с основанием инженерных сооружений». Близкую позицию занимали Я. Дзеваньский, И.С. Комаров, Л.А. Молоков, Ф. Ройтер, которые понимали «под массивом горных пород любую ограниченную в пространстве (по площади и глубине) часть земной коры, соизмеримую с отдельным сооружением или комплексом сооружений, со всеми особенностями ее строения и нарушениями сплошности (разломами, трещинами, пустотами и пр.), содержащимися в ней подземными водами и газами и сформировавшимися в ее пределах физическими полями (напряжений, тепловыми и пр.)». Подчеркивалось, что в теоретическом плане массив горных пород можно рассматривать как сложную геологическую систему, обладающую некоторыми общими характеристиками: структурой, вещественным составом, физическим состоянием, определенными свойствами и динамикой.

Все эти определения имеют принципиальное единство: *массив горных пород рассматривается как геологический объект, взаимодействующий с конкретным инженерным сооружением или комплексом сооружений*. В соответствии с этим его границы определяются не только геолого-структурными (или шире – инженерно-геологическими) особенностями осваиваемой территории (как при первом из описанных подходов), но и типом сооружений, их размерами, характером взаимодействия с природной средой и др. Это обуславливает большую четкость существа рассматриваемого понятия, его объем, что имеет явные преимущества как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Следует подчеркнуть, что по существу сторонники первого и второго подходов говорят о разных понятиях, о разных объектах исследований. Представители первого направления исследуют массив горных пород с инженерно-геологических позиций как природную геологическую литосистему реальную, второго – как природно-техническую литосистему. С этим связаны и различия в употребляемой терминологии. Представляется целесообразным в первом случае говорить о «массиве горных пород», рассматривая это словосочетание как термин свободного пользования, во втором – об «инженерно-геологическом массиве». Объем последнего рационально рассматривать в полном объеме сферы воздействия инженерных сооружений на горные породы. Под сферой воздействия Н.В. Коломенский предложил понимать объем горных пород, в пределах которого могут произойти те или иные изменения естественных условий в процессе строительства и эксплуатации сооружения.

Какое же место занимает в этой системе понятие «массив грунтов»? *Строго говоря – оно должно использоваться в обеих ситуациях. Особенно в тех, когда в пределах изучаемого объекта находятся не только горные породы, но и осадки, почвы и антропогенные породоподобные геологические образования*, которые входят в качестве составных частей объема понятия «грунт».

В публикациях по вопросам региональной инженерной геологии стал широко использоваться термин «грунтовая толща», введенный в грунтоведение М.М. Филатовым еще в 1936 г. В большинстве случаев он употреблялся как термин свободного пользования для наименования любой совокупности горных пород, характеризующейся в инженерно-геологических целях. Конкретизируя его, П.И. Фадеев в 1963 г. *предложил понимать под грунтовой толщей толщу горных пород и почв, находящихся в зоне активного воздействия инженерного сооружения*. Аналогичный смысл термину «грунтовая толща» придавал и Е.М. Сергеев, А.С. Герасимова, В.Т. Трофимов и др. *При таком понимании содержания этого понятия оно по существу становится логическим синонимом понятия «инженерно-геологический массив», «массив грунтов».*

Понятие «грунтовая толща» стало широко использоваться в региональной инженерной геологии, в том числе и при создании нового аналитического типа карт инженерно-геологических условий. Первая такая карта с названием «Карта грунтовых толщ Западно-Сибирской плиты масштаба 1 : 1 500 000» была опубликована в 1972 году. Позже были составлены карты грунтовых толщ Нечерноземной зоны европейской части РСФСР, затем и всей европейской части СССР, включая Кавказ. Поскольку эти материалы малоизвестны современным специалистам и важны с точки зрения обсуждаемого вопроса, приведу следующие сведения: определение содержания понятия «грунтовая толща»; данные об их мощности в выполненных работах; совокупность параметров, использованных для их характеристики; построения систематики грунтовых толщ и иерархических единиц, выделяемых в ней.

Под грунтовой толщей понимают толщу грунтов (горных пород, осадков, почв и антропогенных породоподобных геологических образований), слагающих верхнюю часть разреза различных геомор-

фологических элементов, находящихся в зоне (или могущих попасть при освоении в зону) активного воздействия инженерных сооружений. Мощность такой толщи для сооружений массовых видов строительства – гражданского, дорожного, сельскохозяйственного, трубопроводного и др., принималась в осуществленных работах 10-метровой, для гидротехнических сооружений в 20 м. При разработке систематики грунтовых толщ были использованы *только морфологические* показатели двух групп. В первую из них объединялись показатели состава и строения толщ, во вторую – показатели современного состояния грунтовых толщ. Содержание всех выделенных при таком подходе таксонов проводилось на основе одновременного учета обеих этих групп показателей.

В последнем десятилетии ушедшего века в региональную инженерную геологию – третье научное направление инженерной геологии – было введено новое научное понятие – *«инженерно-геологические структуры»*. Это было осуществлено Т.И. Аверкиной в ее кандидатской диссертации в 1994 г. Дальнейшее развитие этого подхода сотрудниками кафедры инженерной и экологической геологии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова привело к созданию одноименного учения.

Понятие «инженерно-геологические структуры» было определено следующим образом: **инженерно-геологические структуры** – *это закономерно организованные объемы или части литосферы, сформированные под влиянием определенных региональных и зональных геологических факторов и однородные по каким-либо (в принципе заранее определенным) инженерно-геологическим параметрам.* Меняя сочетание региональных и зональных геологических факторов (а, следовательно, и соответствующие им инженерно-геологические параметры), переходя от общих к частным, были обособлены инженерно-геологические структуры разного содержания и разных иерархических уровней. При этом в качестве классификационного признака выступает сложное (двухчленное) основание деления. Предложено структуры *первого уровня*, самые крупные, называть инженерно-геологическими суперструктурами, *второго* – инженерно-геологическими мегаструктурами, третьего – инженерно-геологическими макроструктурами, четвертого – инженерно-геологическими мезоструктурами.

Позиции учения об инженерно-геологических структурах территории Земли и их пространственном распределении подробно охарактеризованы В.Т. Трофимовым и Т.И. Аверкиной в монографии «Теоретические основы региональной инженерной геологии», опубликованной в 2007 г. Третий том монографии, в которой охарактеризованы инженерно-геологические условия нашей страны, назван «Инженерная геология России. Том 3. Инженерно-геологические структуры России». Он издан под редакцией В.Т. Трофимова и Т.И. Аверкиной в 2015 году, его объем 710 страниц формата 60x84/8 (82,5 печ. л.). В учебнике «Инженерная геология», опубликованном В.Т. Трофимовым в 2023 году, описанию основных теоретических позиций учения об инженерно-геологических структурах посвящена отдельная глава.

Предлагаемый ряд инженерно-геологических структур, в принципе, может быть продолжен структурами, имеющими меньший объем и большую инженерно-геологическую однородность, но на каком-то этапе деление, по мнению Т.И. Аверкиной, неизбежно выйдет на формационный уровень. В итоге общая классификация геологических объектов, рассматриваемых с инженерно-геологических позиций (но без связи с конкретными сооружениями), может иметь следующий вид: инженерно-геологические суперструктуры инженерно-геологические мегаструктуры инженерно-геологические макроструктуры инженерно-геологические мезоструктуры ... формации (инженерно-геологические формации) субформации (инженерно-геологические субформации) геолого-генетический комплекс монопородное геологическое тело первого уровня расчленения монопородное геологическое тело второго уровня расчленения монопородное геологическое тело третьего уровня расчленения.

Вывод по первой позиции. Определенная работа по ее разработке проведена. Но многие положения требуют дальнейшего обдумывания на пути создания систематики понятий, характеризующих объемные инженерно-геологические «выделы» разных авторов, включая и таксономические единицы инженерно-геологического районирования И.В. Попова.

Вторая позиция. Наша конференция называется «Массивы грунтов как *жизнеобеспечивающий ресурс общества*» (курсив мой. – В.Т.). Считаю употребление этого словосочетания, хотя и не привычного для инженерно-геологической литературы, правомерным. Для доказательства этого использую два положения из теории инженерной геологии и нормативов инженерно-геологических изысканий для строительства и один – из теории экологической геологии.

В первом из этих положений – теории инженерной геологии – зафиксировано, что инженер-геолог в процессе своей деятельности исследует четыре типа систем, основу которых составляет массив: 1) природную геологическую реальную (природную литосистему реальную), 2) природную геологическую идеальную (природную литосистему идеальную), 3) природно-техническую литосистему идеальную, 4) природно-техническую литосистему реальную (рис. 1). И все это направлено на создание жизнеобеспечивающих условий деятельности социума.

При изучении *природной литосистемы реальной* все работы направлены на выявление состава, состояния, строения и свойств инженерно-геологических условий этой системы и закономерностей их формирования (морфологическая и ретроспективная задачи). В самом явном виде это осуществляется при региональных инженерно-геологических исследованиях, особенно в неосвоенных районах, и на первых этапах инженерно-геологических изысканий.

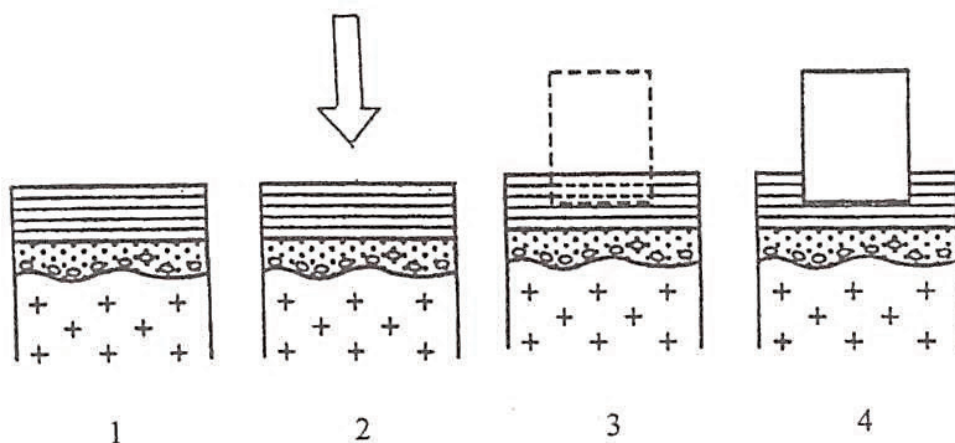


Рис. 1. Типы систем, исследуемых инженерной геологией

1 – природная литосистема реальная; 2 – природная литосистема идеальная; 3 – природно-техническая литосистема идеальная; 4 – природно-техническая литосистема реальная. Стрелкой обозначены внешние природные воздействия на систему

Если в ходе региональных работ прогнозируется трансформация инженерно-геологических условий под влиянием изменяющихся *природных* факторов или, наоборот, восстанавливается картина геологического прошлого (ретроспективная и прогнозная задачи), то мы имеем дело с *природной литосистемой идеальной*.

В том случае, когда просчитываются различные варианты изменения инженерно-геологических условий под влиянием потенциальных (предполагаемых) *антропогенных* воздействий, исследователь работает в рамках *природно-технической системы идеальной*. На этом этапе реально существует только определенный объем литосферы (массив грунтов), изученный в инженерно-геологическом отношении с определенной достоверностью. Никаких инженерных сооружений и технических воздействий от них еще нет, поэтому приходится мысленно создавать, конструировать природно-техническую литосистему. Однако именно на этом этапе нужно определить ее важнейшие морфологические особенности и режим функционирования: типы и размеры сооружений, особенности их конструкций в данной инженерно-геологической обстановке (например, сейсмостойкие), особенности режима эксплуатации. Следует спрогнозировать реакцию среды на техногенное воздействие, при необходимости обосновать и создать проект схемы защиты инженерных сооружений и территорий от вероятных геологических процессов.

Литосистемы данного типа изучаются не только в прикладном плане, но и в ходе научных исследований. В частности, именно они выступают в качестве объектов изучения при разработке многовариантных прогнозов поведения ПТС, в ходе которых мы задаем различные варианты потенциальных антропогенных воздействий.

Природно-техническая литосистема реальная создается в процессе строительства или какого-либо другого вида хозяйственной деятельности и функционирует в ходе эксплуатации инженерных

сооружений. На стадии эксплуатации инженер-геолог определяет количественные и качественные характеристики физического взаимодействия технических объектов с геологической подсистемой путем проведения режимных наблюдений или литомониторинга. По результатам этих работ в случае необходимости разрабатывается и осуществляется управление природно-технической литосистемой.

Второе положение – из системы нормативных документов по проведению инженерных изысканий для строительства. В Своде правил СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства *назначение инженерных изысканий*, в том числе и инженерно-геологических, сформулировано следующим образом. Они выполняются для: 1) подготовки документов территориального планирования; 2) подготовки документации по планировке территории; 3) выбора площадок (трасс) строительства; 4) архитектурно-строительного проектирования; 5) строительства и реконструкции объектов капитального строительства; 6) капитального ремонта автомобильных дорог общего пользования. Работы, обозначенные цифрами 1, 2 и 3, в восьмидесятых и девяностых годах прошлого века относились к предпроектным (стадии – схема и технико-экономическое обоснование), цифрой 4 – к проектным (стадии – проект и рабочая документация).

Инженерно-геологические изыскания как обязательный вид выполняются для подготовки документации на всех этапах градостроительной деятельности. И всегда и везде при их проведении главным объектом изучения был массив грунтов (его состав, строение, состояние и свойства) и комплекс современных и прогнозируемых природных и антропогенно обусловленных процессов.

| Виды подготовки документации | ТП | ПТ | ВПТ | АРСП | | СЗС | РЗС | КРАД |
|------------------------------|----|----|-----|------|-----|-----|-----|------|
| | | | | ПД | ПДП | | | |
| Объемы ИЭЖ информации | | | | | | | | |

Рис. 2. Соотношение объемов инженерно-геологической информации (ИГ), получаемой в процессе инженерно-геологических изысканий для подготовки документов территориального планирования (ТП), документации по планированию территории (ПТ), выбора площадок (трасс) строительства (ВПТ), архитектурно-строительного проектирования (АРСП) при подготовке проектов капитального строительства – первый этап (ПД) и второй этап (ПДП), при строительстве (СЗС) и реконструкции зданий и сооружений (РЗС), подготовке документации капитального ремонта автомобильных дорог общего пользования (КРАД)

Объемы решаемых задач и получаемой информации в процессе их выполнения на разных этапах деятельности неодинаковы (это схематично показано на рис. 2). С переходом от первого этапа этой деятельности к последующим сокращаются размеры изучаемого в процессе инженерно-геологических изысканий геологического пространства; усложняются виды и объемы инженерно-геологических и других специальных работ; возрастают требования к точности инженерно-геологических оценок, прогнозов и рекомендаций.

Столь же важна роль инженерно-геологической информации в обеспечении *жизненного цикла зданий и сооружений*. Этот цикл охватывает период, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование строительство, включая консервацию объекта, эксплуатация, в том числе текущие ремонты, реконструкция, капитальный ремонт и снос здания или сооружения. И в этом плане массив грунтов, безусловно, можно рассматривать как жизнеобеспечивающий ресурс функционирования социума.

Массивы грунтов обеспечивают не только возможность функционирования социума, но и *ресурсное и энергетическое обеспечение биоты*. Это осуществляется экологическими функциями и экологическими свойствами литосферы. Они представляют все многообразие ее составляющих, обеспечивающих функционирование биоты, включая человека. Таких функций четыре: ресурсная, геодинамическая, геохимическая и геофизическая. Общая их систематика и составляющие показаны на рис. 3. Именно эти функции создают условия для функционирования Живого в эколого-геологических системах, экосистемах в целом.

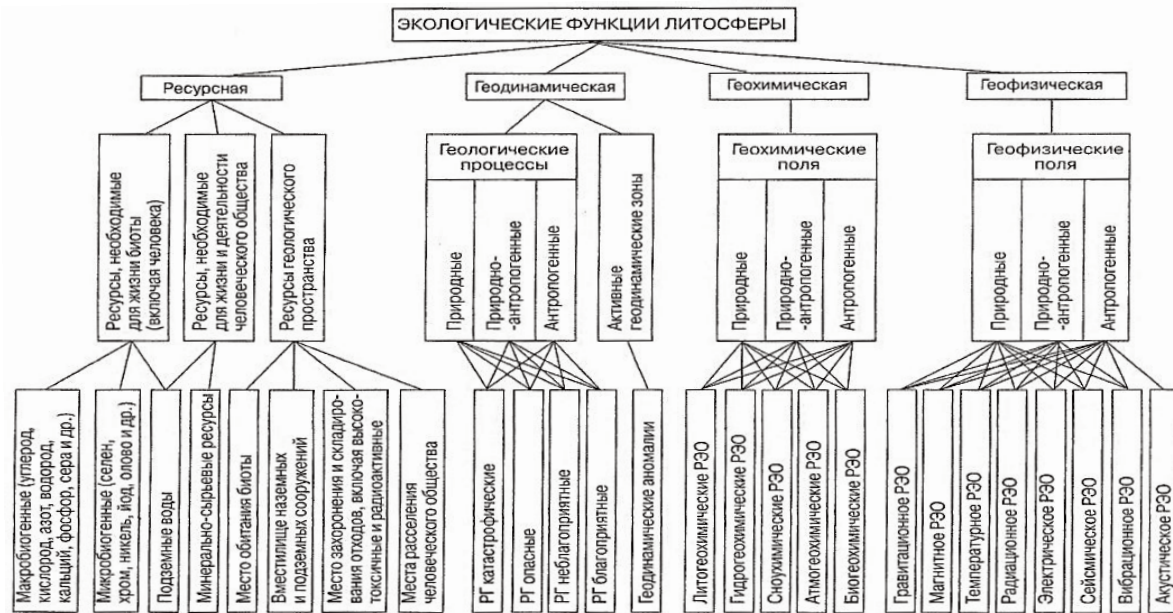


Рис. 3. Систематика экологических функций литосферы и их составляющих
 (по В.Т. Трофимову и Д.Г. Зилингу, 2002; с дополнениями):
 РГ – разного генезиса; РЭО – разной экологической опасности

Вывод, вытекающий из этих данных, свидетельствует, что *массив грунтов, безусловно, относится к жизнеобеспечивающему ресурсу социума*, как и атмосфера, и поверхностная гидросфера.

СЕКЦИЯ 1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ С ОБЪЕКТАМИ ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА НАСЫПНОЙ МАССИВ ГРУНТОВ НА ПРИМЕРЕ АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПОДПОВЕРХНОСТНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

И.А. Бабуркин, И.В. Крячков

Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева, 101000, г. Москва, Уланский переулок, дом 13, строение 2, а/я 145
E-mail: Ivan.mine999.0@mail.ru, E-mail: pudov0100@mail.ru

Метод георадиолокации достаточно давно и успешно используется для обследования высоких насыпей автомобильных, железных дорог и земляных дамб с целью неразрушающего контроля их эксплуатационной надежности. Метод георадиолокации позволяет выделять в искусственных грунтовых сооружениях литологические границы на глубину до 12-15 м [3], а также по характерному аномальному типу записи волновой картины обнаруживать признаки зон повышенной влажности и зон разуплотнений/просадок в насыпных массивах грунтов, а по характерным типам отражения - выделять в структуре сооружения неоднородные локальные включения и объекты [1].

Целью проведённых исследований являлось определение аномальных зон, представляющих собой участки повышенной влажности и разуплотнений в теле насыпи земляного полотна железной дороги, вероятно образовавшихся под влиянием её непрерывной эксплуатации, а актуальность работы обусловлена в первую очередь распространённостью инженерной деятельности человека и, как следствие, важностью определения её влияния на геологическую среду, а во вторую очередь возможностью применить полученные данные в подобного рода вопросах в будущем [6].

В качестве объекта исследования была выбрана железная дорога, находящаяся на территории Амурской области. Для выполнения георадиолокационного обследования использовался георадар ОКО-3 с двухчастотным антенным блоком 150/400 МГц.

Исследования проводились в режиме пешеходного профилирования: антенный блок перемещался непрерывно вдоль профиля наблюдения с равномерной скоростью 3-5 км/ч (рис. 1).



Рис. 1 - Проведение георадарных исследований

Профилирование по основному ходу в продольном направлении выполнялось по правому плечу балластной призмы на максимальную глубину около 10 м.

Данные, полученные в ходе георадиолокационных исследований, представляли собой наборы одиночных трасс, зарегистрированных приемной антенной при каждом положении георадара - радарограммы (рис. 2) [2].

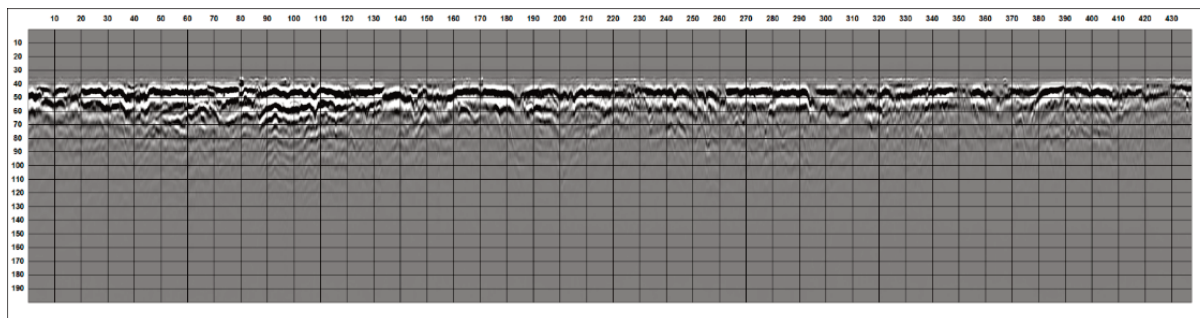


Рис. 2 - Пример необработанной радарограммы

Сущность обработки георадиолокационных данных состоит, прежде всего, в выделении полезного сигнала на фоне помех и шума. Методика обработки и интерпретации данных проводится в программе «Geoscan32» [4]. Обработка позволила провести дальнейшую интерпретацию полученных данных.

В процессе интерпретации глубинных разрезов с целью определения участков разуплотнения в грунтах насыпи выделялись аномальные фрагменты записи электромагнитного сигнала по характерному типу записи волновой картины. Выделялись участки высокоамплитудной записи, участки с низкочастотной записью, также участки затухания сигнала, которые могут соответствовать участкам повышенной влажности и разуплотнения [5]. Выделение аномальных участков записи проводится практически без учета геологической информации, основываясь только на общем анализе волновой картины.

По результатам проведённых работ были выделены аномалии различного генезиса, наибольший интерес из которых представляют зоны разуплотнения и участки повышенной влажности, первые из которых вероятно образовались под влиянием интенсивного движения железнодорожных поездов (рис. 3).

В результате интерпретации полученных глубинных разрезов можно сделать выводы:

Толщина щебенистого балласта на всём обследованном участке меняется от 0,4 до 1,8 м, причём наибольшая мощность щебня регистрируется на участках просадок.

В толще земляного полотна, на глубине до 4 м, по признакам изменения амплитудно-частотных характеристик сигнала выделены участки повышенной влажности в грунтах земляного полотна, а также достаточно протяженные области предположительно недостаточной степени уплотнения грунтов земляного полотна.

Области повышенной влажности в грунтах земляного полотна выделены в районе прокладки водопропускных труб, а также на участках, где проявляются внешние признаки деформации земляного полотна.

В грунтах естественного основания как непосредственно под земляным полотном, так и по краям насыпи, а конкретно в толще песков средней крупности, выделены небольшие по толщине (от 1 до 1,5-2 м) линзы суглинистых грунтов.

На месте проведения работ присутствовали визуально опознаваемые участки просадок на протяжении всей длины железной дороги, чьё положение позднее подтвердилось полученными по георадиолокационному методу данными.

В качестве заключения имеет смысл упомянуть, что по результатам исследований, эффективность использования метода георадиолокации в качестве неразрушающего метода поиска весьма высока, причём не только в сфере определения влияния инженерной деятельности на природные/техногенные системы, но и в таких сферах как картирование литолого-геологических границ и последующее построение геологических разрезов, определение положения уровня грунтовых вод, определение толщины льда, определение карстовых воронок/пустот и т.д.

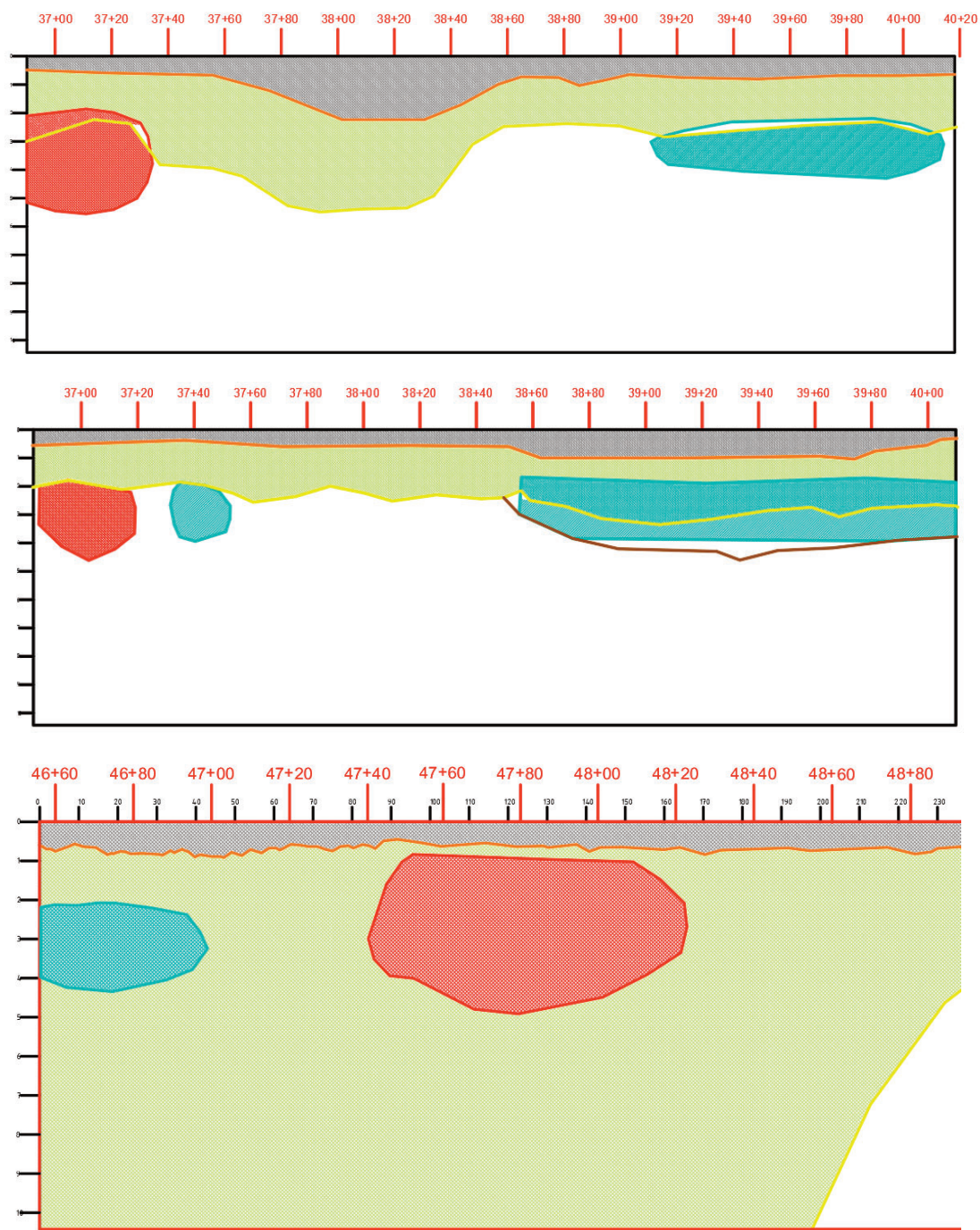


Рис. 3 - Некоторые глубинные разрезы с выделенными аномальными зонами (красной штриховкой отмечены зоны разуплотнения и деформации, голубой штриховкой - зоны повышенной влажности, серой штриховкой - насыпь щебенистого грунта, жёлтой штриховкой - насыпь песка, оранжевой линией - подошва щебенистого грунта, жёлтой линией - подошва грунтов естественного основания)

Литература

1. Владов М.Л., Золотарев В.П., Старовойтов А.В. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований //М.: GDS Production. - 1997.
2. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. - 2004.
3. Матюшенко А.А., Иванов А.А. Определение толщины верхних слоёв искусственного покрытия автодорог методом георадиолокации на примере Екатеринбурга // Разведочная геофизика и геоинформатика : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 18-19 марта 2020 года. - Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2020.

4. Матюшенко А.А., Кудина Я.О., Посеренин А.И., Иванов А.А. Опыт применения метода георадиолокации для определения конструкции дорожной насыпи // Молодые - Наукам о Земле : Материалы IX Международной научной конференции молодых ученых. В 7-ми томах, Москва, 23 октября 2020 года /Том 4. - Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2020.
5. Огильви А.А. - Основы инженерной геофизики. - М.: Изд-во «Недра»,1990 г.
6. Старовойтов А.В., Владов М.Л. Интерпретация данных георадиолокационных наблюдений //М.: изд-во МГУ. - 2008.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

А.Г. Барановский

ООО «Трансстроймеханизация», 454071, Россия, г. Москва, ул. Киевская, д. 7
E-mail: geologia85@mail.ru

В соответствии с требованиями СП 446.1325800.2019 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» одной из главных задач инженерно-геологических изысканий является разработка прогноза возможных изменений инженерно-геологических условий в сфере взаимодействия проектируемых объектов с геологической средой.

Наиболее актуальной эта проблема является для районов распространения слабопроницаемых грунтов повышенного увлажнения, где строительство, как правило, вызывает прогрессирующий подъём уровня грунтовых вод и подтопление строящегося объекта.

Изменчивость физико-механических свойств под воздействием техногенных факторов широко освещается в научной литературе. Написано много научно-исследовательских работ, анализирующих закономерности изменения физико-механических показателей разных по происхождению грунтов [1-6 и др.].

С целью оценки изменчивости физико-механических свойств грунтов, выявления изменения их состояния в сфере взаимодействия зданий и сооружений с геологической средой, в том числе, на участках расположения зданий и сооружений с деформациями и значительными осадками, нарушающими их устойчивость и режим нормальной эксплуатации был выполнен анализ архивных данных (проходка шурфов, лабораторные исследования) обследования грунтов основания в зоне влияния и вне зоны влияния существующих зданий и сооружений как производственного, так и не производственного назначения.

Объектами исследований служили глинистые и скальные грунты эолово-делювиального, делювиального, аллювиального и интрузивного происхождения.

В ходе настоящих исследований оценивались результаты обследования грунтов основания зданий и сооружений.

Методика проведения обследований грунтов основания приведена в ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния»

Результаты лабораторных исследований по каждой разновидности грунта отражены в таблице. Типовые геотехнические разрезы приведены на рис. 1.

Всего были проанализированы материалы исследований грунтов основания 7 реконструируемых объектов различного функционального назначения (от производственного цеха до здания дома отдыха).

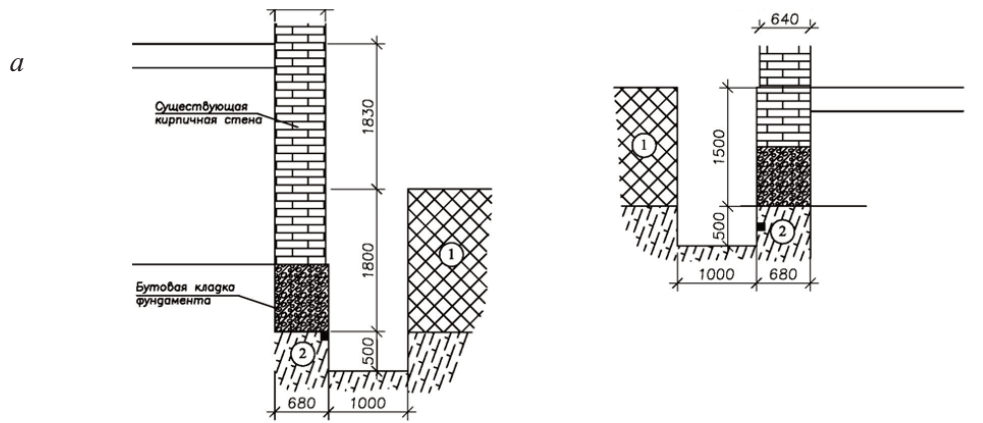
Анализ свойств грунтов, отобранных вне и в пределах зоны влияния существующих объектов инженерно-хозяйственной деятельности, показал, что для грунтов, залегающих в зоне влияния существующих фундаментов характерны следующие закономерности:

1. скальные грунты в процессе эксплуатации здания / сооружения не изменяют своих физико-механических свойств по причине прочности первичных структурных связей;

2. на участках залегания в основании фундамента глинистых грунтов, вдоль водонесущих коммуникаций, а также при использовании в производственном процессе воды с течением времени происходит увеличение влажности, что влечет за собой ухудшение прочностных и деформационных свойств грунтов основания (здание дома отдыха);

3. в случае отсутствия в производственном процессе воды, под воздействием веса строительных конструкций здания/сооружения происходит отжим гравитационной воды, что приводит к уменьшению влажности и увеличению плотности, а следовательно, и увеличению механических свойств грунтов основания (производственное здание).

Таким образом, при оценке изменчивости свойств грунтов при эксплуатации производственного здания / сооружения следует анализировать технологический процесс, используемый на производ-



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ К РАЗРЕЗАМ

- ① Техногенный насыпной грунт крупнообломочный, механическая смесь суглинка, почвы, щебня, дресвы и строительного мусора (обломки кирпича), слежавшийся
 ② Скальный грунт (гранито-гнейс) прочный, сильнотрещиноватый, слабыветревший, среднекристаллический, массивный, бурого цвета
 ② Номер инженерно-геологического элемента
 Точка отбора образца грунта с ненарушенной структурой (монолит), м

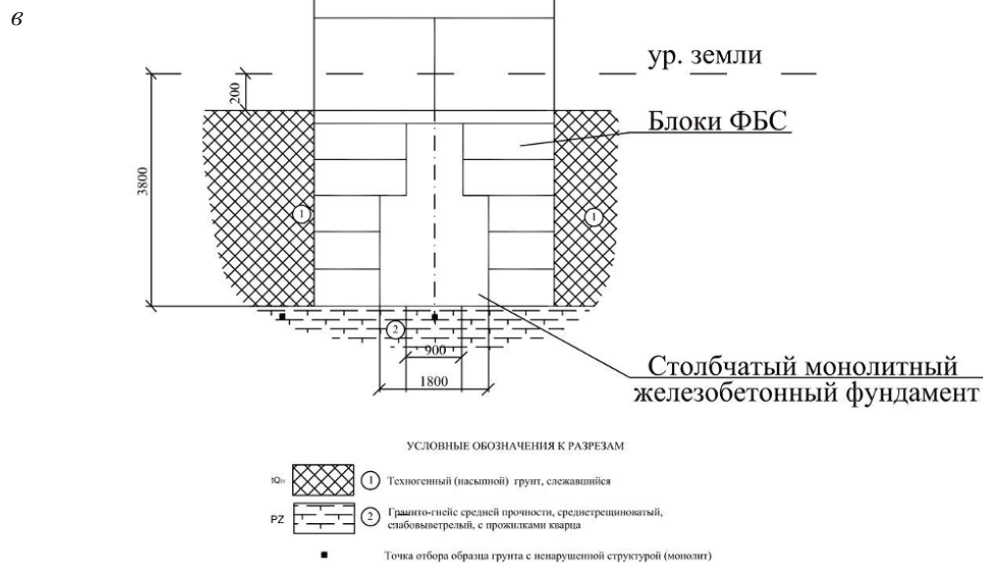
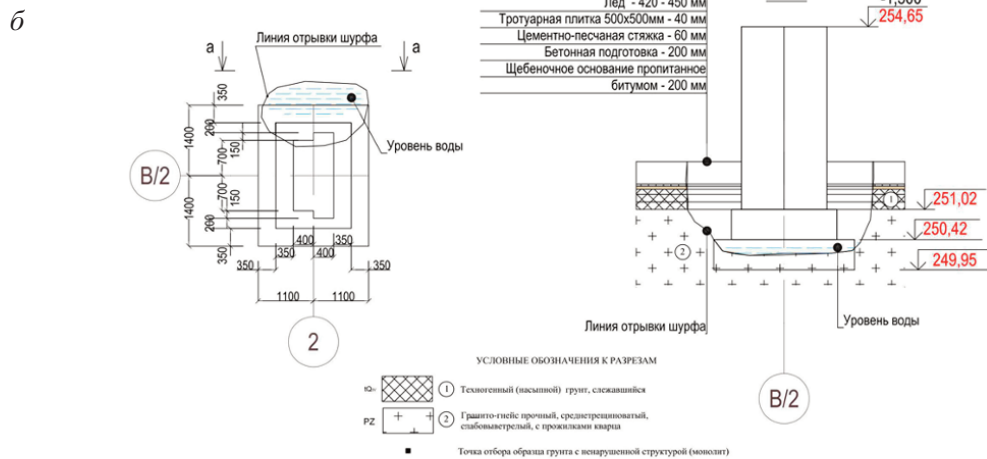
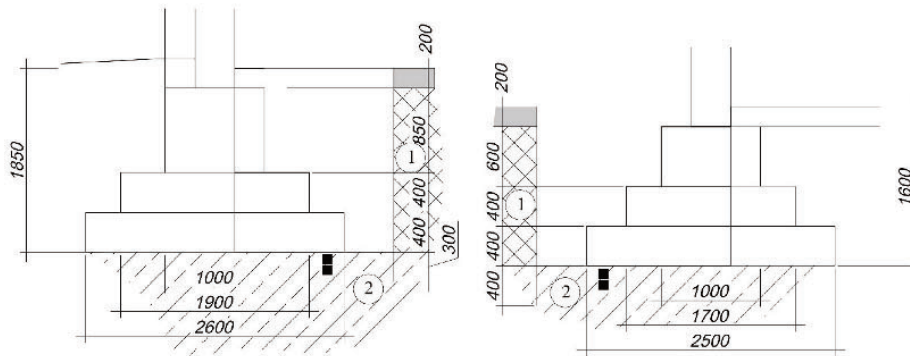
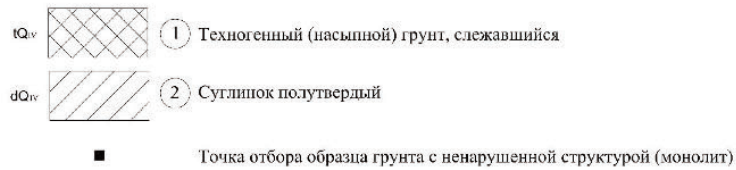


Рис. 1. Типовые геотехнические разрезы шурфов. а) здание госпиталя (г. Касли); б) цех обогащения (г. Кыштым); в) дробильно-сортировочный цех (г. Кыштым); г) цех по изготовлению металлоконструкций (г. Челябинск); д) доменная печь №6 (г. Магнитогорск); е) производственное здание (г. Челябинск)

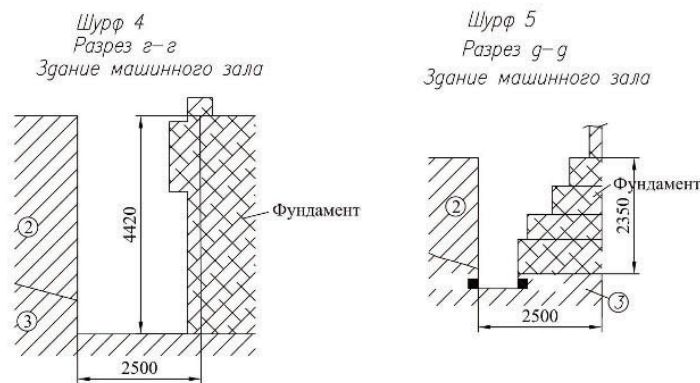
2



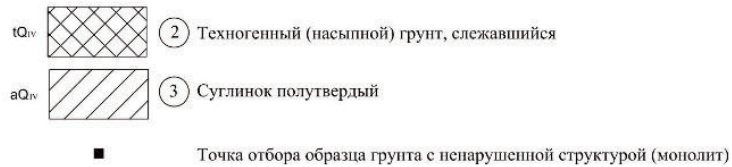
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ К РАЗРЕЗАМ



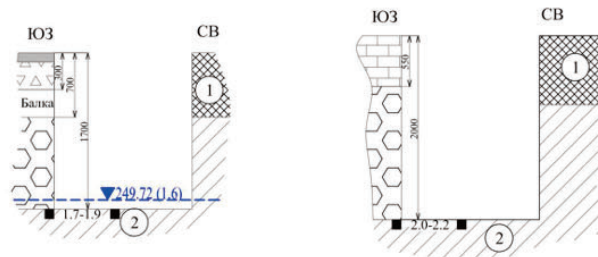
д



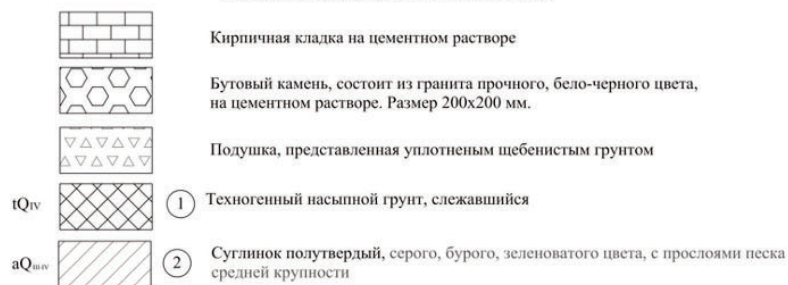
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ К РАЗРЕЗАМ



е



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ К РАЗРЕЗАМ



Нормативные значения физико-механических свойств исследуемых грунтов в пределах зоны влияния и вне зоны влияния здания или сооружения

| Здание/сооружение | Разновидность грунта | Наименование показателя | Ед. изм. | Место исследования относительно рассматриваемого объекта | |
|---|---------------------------------|--|-------------------|--|----------------|
| | | | | Вне зоны влияния | В зоне влияния |
| Здание госпиталя (г. Касли) | Гранито-гнейс прочный | Плотность грунта ρ | г/см ³ | 2.70 | 2.70 |
| | | Предел прочности при сжатии в воздушно-сухом состоянии | МПа | 113.0 | 107.7 |
| | | Пористость n | % | 6.08 | 5.27 |
| | | Коэффициент размягчаемости K_{sof} | д.е. | 0.70 | 0.70 |
| | | Коэффициент выветрелости K_{vgr} | д.е. | 0.97 | 0.97 |
| Цех обогащения (г. Кыштым) | Гранито-гнейс очень прочный | Плотность грунта ρ | г/см ³ | 2.88 | 2.73 |
| | | Предел прочности при сжатии в воздушно-сухом состоянии | МПа | 134.1 | 131.0 |
| | | Пористость n | % | 3.6 | 2.9 |
| | | Коэффициент размягчаемости K_{sof} | д.е. | 0.97 | 0.56 |
| | | Коэффициент выветрелости K_{vgr} | д.е. | 0.96 | 0.97 |
| Дробильно-сортировочный цех (г. Кыштым) | Гранито-гнейс средней прочности | Плотность грунта ρ | г/см ³ | 2.94 | 2.99 |
| | | Предел прочности при сжатии в воздушно-сухом состоянии | МПа | 45.6 | 41.7 |
| | | Пористость n | % | 3.4 | 4.7 |
| | | Коэффициент размягчаемости K_{sof} | д.е. | 0.43 | 0.62 |
| | | Коэффициент выветрелости K_{vgr} | д.е. | 0.97 | 0.95 |
| Здание дома отдыха (Новосибирская область) | Супесь золово-делювиальная | Плотность грунта ρ | г/см ³ | 1.62 | 1.72 |
| | | Влажность ω | % | 8 | 16 |
| | | Показатель текучести I_L | д.е. | <0 | 0.48 |
| | | Коэффициент водонасыщения S_r | д.е. | 0.33 | 0.74 |
| | | Удельное сцепление c | кПа | 20 | 16 |
| Цех по изготовлению металлоконструкций (г. Челябинск) | Суглинок делювиальный | Угол внутреннего трения φ | градус | 26 | 25 |
| | | Одометрический модуль деформации E_{oed} | МПа | 14.3 | 12.5 |
| | | Плотность грунта ρ | г/см ³ | 1.93 | 1.93 |
| | | Влажность ω | % | 14.2 | 15.4 |
| | | Показатель текучести I_L | д.е. | 0.00 | 0.22 |
| Доменная печь №6 (г. Магнитогорск) | Суглинок аллювиальный | Коэффициент водонасыщения S_r | д.е. | 0.63 | 0.60 |
| | | Удельное сцепление c | кПа | 24 | 23 |
| | | Угол внутреннего трения φ | градус | 19 | 19 |
| | | Одометрический модуль деформации E_{oed} | МПа | 5.9 | 6.0 |
| | | Плотность грунта ρ | г/см ³ | 2.03 | 2.02 |
| Производственное здание (г. Челябинск) | Суглинок аллювиальный | Влажность ω | % | 23 | 26 |
| | | Показатель текучести I_L | д.е. | 0.27 | 0.43 |
| | | Коэффициент водонасыщения S_r | д.е. | 0.91 | 0.98 |
| | | Плотность грунта ρ | г/см ³ | 2.09 | 2.21 |
| | | Влажность ω | % | 19 | 12 |
| Производственное здание (г. Челябинск) | Суглинок аллювиальный | Показатель текучести I_L | д.е. | 0.10 | 0.11 |
| | | Коэффициент водонасыщения S_r | д.е. | 0.92 | 0.82 |
| | | Удельное сцепление c | кПа | 41 | 50 |
| | | Угол внутреннего трения φ | градус | 13 | 23 |
| | | Одометрический модуль деформации E_{oed} | МПа | 5.5 | 5.0 |

стве, при эксплуатации зданий непроизводственного назначения грунты основания изменяют свои свойства в худшую сторону только вдоль водонесущих коммуникаций (водопровод, канализация, дренажная система).

В дальнейшем следует уделить внимание данным, получаемым в процессе обследования оснований фундаментов зданий и сооружений, а также произвести более масштабное лабораторное исследование (количественная оценка) физических параметров грунтов основания эксплуатируемых объектов капитального строительства.

Полученная информация позволит разработать общий алгоритм поведения грунтов, являющихся основанием существующих зданий и сооружений, что благоприятно повлияет на прогноз изменчивости физико-механических свойств грунтов основания во временном аспекте.

Литература

1. Воронкевич С.Д., Ларионова Н.А. Физико-химические процессы техногенной эволюции грунтов // Сб. матер. Региональной научно-практической конференции "Геология и полезные ископаемые Западного Урала", Пермь: ПГУ, 2000. с. 287–290.
2. Каримов Р.М. Особенности развития осадок зданий, построенных на элювиальных грунтах в г. Магнитогорске // Вестник ЮУрГУ. Челябинск, 2007. № 22. с. 58–59.
3. Комиссаров О.Г. Особенности формирования водного режима на промышленно освоенных и застроенных территориях // Роль мелиорации и водного хозяйства в реализации национальных проектов (Матер. междунар. научно-практ. конф.). М.: МГУП. 2008. С. 136–139.
4. Котлов Ф.В. Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М.: Недра, 1978. 264 с.
5. Лебзак В.Н. Изменение прочностных и деформационных характеристик лессовых просадочных грунтов при длительной эксплуатации зданий и сооружений // Ползуновский вестник. 2011. № 1. с. 240–246.
6. Пономарев А.Б., Калошина С.В., Салимгариева Н.И. Влияние процесса подтопления на физико-механические свойства грунтов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН, 2013. с. 67–70.

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВАНИЙ И СРЕДЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ БЕЛОРУССИИ

А.Н. Галкин¹, И.А. Красовская¹, А.И. Павловский²

¹ Витебский государственный университет имени П.М. Машерова,
210038, Беларусь, г. Витебск, Московский пр-т, 33
E-mail: galkin-alexandr@yandex.ru

² Белорусский национальный технический университет, 220013, Беларусь, г. Минск,
пр-т Независимости, 65
E-mail: aipavlovsky@mail.ru

Техногенные грунты в практике отечественного градостроительства используются на протяжении уже более полувека. Пойменные, заболоченные территории, овраги, балки, полигоны ТКО и другие «бросовые земли» являются существенным градостроительным резервом. Их освоение во многих случаях позволяет получить более компактную структуру всей городской среды, сократив при этом транспортные магистрали и сеть инженерных коммуникаций, улучшить городской ландшафт и микроклимат. При этом следует отметить, что, при освоении таких территорий часто возникают неблагоприятные гидрогеологические условия или слабые, малопрочные грунты, которые находятся под зданиями и сооружениями. Глубина залегания этих грунтов не позволяет использовать свайный фундамент или удалить их и заменить на более прочные, так как это слишком дорого и требует больших затрат материалов, труда и времени. В таких случаях эффективным способом является использование уплотненных насыпных грунтов, таких как песчано-гравийные и песчано-щебеночные подушки, которые покрывают слабые грунты и служат основным несущим слоем под фундаментами [3]. Примерами проектирования и строительства фундаментов с использованием уплотненных насыпных грунтов могут служить ледовые дворцы в городах Барановичи, Орша и Молодечно [3, 4]. В частности, в Барановичах планировалось построить ледовый дворец на территории, где ранее находились отработанные поля фильтрации ТЭЦ и прилегающая к ним земля. Во время проведения изысканий, поля фильтрации, разделенные дамбами на участки, на которые более 50 лет сбрасывались отходы производства ТЭЦ (песок, зола, шлаки, торфокрошка, известь), были затоплены. Значительная часть территории также подвергалась затоплению поверхностными водами и образованию болот. Кроме того, наличие слабозаторфованных глинистых грунтов толщиной от 0,5 до 3,9 м и слабозаторфованных мергелей толщиной от 0,7 до 3,5 м являлось дополнительным усложняющим фактором. В рамках проекта планировалось построить целый комплекс зданий, включающий в себя Ледовый дворец на 2000 мест, специализированный зал для акробатики на 360 мест, а также здания котельной, очистных сооружений для дождевых вод, резервуаров для дизельного топлива и сливного устройства. Нагрузки на фундаменты были рассчитаны в пределах от 150 до 1950 кН для вертикальной составляющей, от 5 до 55 кН для горизонтальной составляющей и от 2 до 105 кН×м для момента.

В Орше в качестве строительной площадки был выбран участок, в пределах которого расположен бывший котлован, заполненный неуплотненными насыпными грунтами с остатками фундаментов, строительным мусором и другими отходами. В ходе изысканий были обнаружены полости и пустоты глубиной до 2,3 м. Согласно архитектурному проекту, запроектировано одноэтажное здание эллипсообразной формы в плане с габаритными размерами 145,5×112,8 м с переменной высотой от 17 до 30 м из металлического каркаса. По краям ледовой арены предусмотрены двухэтажные пристройки. Под зданием и полом ледовой арены – железобетонная плита. Пролет металлических ферм над ледовой ареной составляет 78 м с шагом 6 м. Нагрузки на фундаменты проектировались: до 3235 кН – вертикальная составляющая, до 278 кН – горизонтальная составляющая, до 263 кН×м – для момента.

В Молодечно усложняющим фактором на выбранной строительной площадке послужило присутствие в несущем слое оснований на глубине 2,5–3,5 м от поверхности земли слабых суглинков мощностью до 3,0 м с модулем деформации 4–8 МПа. Конструктивная схема принималась анало-

гичной схеме ледового дворца в г. Барановичи, но в отличие от последнего с пристройкой к универсальному спортивному залу здания бассейна с элементами аквапарка с глубиной заложения фундаментов на 3 м ниже, чем глубина заложения фундаментов зала.

На всех объектах были запроектированы столбчатые фундаменты из монолитного железобетона. Основные характеристики технического решения фундаментов следующие: 1) давление по подошве фундаментов не более 0,28 МПа, оптимально – 0,25–0,27 МПа; 2) глубина заложения фундаментов не более 2,5 м, оптимально – 1,8–2,3 м; 3) насыпной грунт уплотненной песчаной подушки – песчаный грунт, состоящий из песка крупного, среднего, мелкого (согласно СТБ 943–2007) или их смеси без глинистых частиц (масса частиц менее 0,1 мм не должна превышать 10%); 4) характеристики уплотненных песчаных грунтов под фундаментами на всю их глубину должны быть не менее: $\rho = 17,4 \text{ кН/м}^3$; $c = 1,0 \text{ кПа}$; $\varphi = 34^\circ$; $E = 20 \text{ МПа}$ [3, 4].

Под подошвой фундаментов выполнена уплотненная щебеночная подготовка толщиной 0,10–0,15 м. Толщина уплотненной песчаной подушки под фундаментами составила: 5,0–7,0 м – для дворца в г. Барановичи; 1,0–5,0 м – для дворца в Орше; 1,0–2,6 м – для дворца в г. Молодечно. Мощность уплотненной обратной засыпки под полы и конструкции ледовых полей составила 2,0–2,3 м. Толщина и характеристики уплотненных подушек подбирались таким образом, чтобы обеспечить требования строительных норм в части абсолютных и относительных (неравномерных) осадок фундаментов [3]. Уплотнение песчаных подушек осуществлялось вибродинамическим методом с применением виброкатков как отечественного, так и зарубежного производства (рис. 1).



Рис. 1. Ледовый дворец с залом акробатики в г. Барановичи: а – подготовка площадки строительства, б – этап строительства; в – современный вид (по [4, 5])

Нередко при инженерной подготовке строительных площадок, устраиваемых на «бросовых землях» возникает необходимость перемещения большого количества земляных масс, и наиболее рациональным способом, утвердившимся в настоящее время, является гидронамыв грунтов. Так, использование намывных грунтов на пойменных территориях в городах Белорусского Полесья, отличающихся сложностью инженерно-геологических условий, позволило возводить здания и сооружения (при определенных нагрузках, в зависимости от геологического разреза) как на ленточных, так и свайных фундаментах (рис. 2).

Для наглядности рассмотрим опыт строительства на участке поймы р. Сож в Гомеле пяти домов (№№ 4, 11, 12, 15, 30) различной этажности и жесткости, характер и величина осадок которых

были детально изучены Е.Ф. Винокуровым и А.С. Карамышевым [1]. Основанием фундаментов на рассматриваемой территории являются намывные пески, представленные главным образом песками мелкими средней плотности мощностью до 3,5 м, подстилаемыми современными аллювиальными отложениями поймы реки. В процессе строительства в целях изучения поведения именно-намывного основания под нагрузкой, а также для уточнения несущей способности основания были установлены специальные марки и осуществлено наблюдение за осадкой во времени. Наблюдения позволили установить следующее.



Рис. 2. Строительное освоение массивов намывных песков в микрорайоне «Мельников луг» в Гомеле (по [3])

Два пятиэтажных совершенно одинаковых крупнопанельных дома №№ 11 и 12 с ленточными фундаментами построены на идентичных напластованиях пойменных отложений. Однако осадка фундамента дома № 12 оказалась в 1,5 раза больше, чем дома № 11. Вместе с тем, характер изменения осадок во времени показал, что основная осадка произошла преимущественно в период строительства и составила 80% средней осадки для дома № 11 и 55% для дома № 12. Такое различие в осадках домов объясняется наличием в основании фундамента дома № 11 плотных мелкозернистых песков, в то время как под фундаментом дома № 12 залегают пылеватые пески. Кроме того, под домом № 12 уровень грунтовых вод оказался значительно выше. После заселения осадки в обоих домах несколько возросли, и затем наступило их резкое затухание. Практически консолидация закончилась через год. Аналогичный характер протекания осадок наблюдался и у дома № 15. Особенностью этого дома является то, что по продольной оси фундамент одного угла дома опирается на пойменный мелкий песок средней плотности, а другой угол опирается на 2,5-метровую толщу намывного песка, подстилаемого толщей плотных мелких и пылеватых песков. Абсолютная величина осадки здания составила 16 мм. При этом, характер осадки фундамента дома в разных частях здания оказался совершенно одинаков, несмотря на различия в отметках залегания грунтовых вод.

Девятиэтажный крупнопанельный дом № 30 построен на самой границе надпойменной террасы и поймы, характеризующейся большой неровностью напластования грунтов, особенно в поперечном направлении дома. Это обстоятельство вызвало необходимость устройства свайного фундамента, хотя первоначальным проектом предусматривался ленточный фундамент. Дальнейшее наблюдение за осадкой дома подтвердило обоснованность таких опасений. Определенный интерес представляют наблюдения за осадкой дома № 4, специально построенного на двух разных типах фундаментов: половина дома – на ленточном фундаменте, а другая половина – на свайном. Основанием фундаментов этого дома являются те же многослойные аллювиальные отложения поймы

Сожа, представленные в основном пылеватými плотными песками с различным содержанием глинистых частиц. Осадки двух половин дома отличаются тем, что деформация ленточного фундамента началась несколько раньше, при меньших нагрузках, чем свайного фундамента. В дальнейшем характер осадок обеих половин здания оказался одинаковым. К концу заселения произошли основные деформации, составляющие 80% полной осадки, после этого деформации, медленно затухая, прекратились в течение двух месяцев. Характерным является значительное увеличение осадок середины дома и большая разница значений осадок ленточного фундамента. Причиной этого, как показали исследования [1], является более значительная величина поверхностного слоя поймы, который был удален не полностью, а также местное понижение рельефа на этом участке, способствующее аккумуляции пылеватых фракций грунта при намыве. В целом, фактические осадки жилых домов, построенных на пойменно-намывных грунтах, оказались значительно меньше допустимых для данного класса зданий [3].

Говоря о создании искусственно созданных грунтовых оснований, следует отметить и использование искусственно улучшенных естественных оснований. Эти основания в настоящее время создаются многими конструктивными методами, среди которых можно назвать вытрамбовывание котлованов и устройство грунтовых подушек, армирование грунтовых массивов буронабивными сваями, упрочнение массивов высоконапорной струйной цементацией и др. Так, например, технология высоконапорной цементации грунтов нашла применение на ряде объектов в Минске, Гомеле, Жлобине и других городах при устройстве противодиффузионных ванн, подпорных стен, усилении основания фундаментов зданий при реконструкции, прокладке подземных коммуникаций и т.д.

Одним из перспективных в Белоруссии методов искусственного улучшения грунтов оснований является комбинированный метод с применением песчано-гравийных (ПГС) и щебеночных (ЩС) свай, который заключается в сочетании глубинного уплотнения грунтов, поверхностного уплотнения и возведения грунтовой подушки, причем все эти действия производятся без перемещения грунтовых масс. Такая технология подготовки оснований одновременно улучшает как свойства грунтов, так и их работу в системе основание – фундамент [3]. Сама технология устройства геомассивов с применением ПГС и ЩС представляет собой последовательное осуществление подготовительных работ, устройства в основании тем или иным способом песчано-гравийных и щебеночных свай, отсыпки под пятно фундамента щебеночной подушки и поверхностного уплотнения основания укаткой или виброуплотнением с образованием единого сваегрунтового массива. По воспринимаемым вертикальным нагрузкам от надфундаментных конструкций рациональная область применения геомассивов из ПГС и ЩС очерчена следующим образом. Столбчатые фундаменты на песчано-гравийных и щебеночных сваях в вытрамбованных скважинах выдерживают до 5000 кН на колонну, ленточные – до 600 кН/м по обрезу стены. В буровых – до 3000 кН и до 250 кН/м и в вибросформированных скважинах – до 2500 кН и до 250 кН/м соответственно. Кроме того, на рациональную область применения геомассивов из ПГС и ЩС в вытрамбованных и буровых скважинах ограничения накладывают и грунтовые условия. Так, песчано-грунтовые сваи применяются в песчаных грунтах со степенью влажности от 0,1 до 0,8, глинах и суглинках с показателем текучести от 0,5 до 0,75 и супесях с показателем текучести от 0,25 до 1,0. Щебеночные сваи применяются в песчаных грунтах со степенью влажности от 0,1 до 0,8, глинах и суглинках с показателем текучести от 0,5 до 1,0 и супесях с показателем текучести от 0,25 до 1,0. Геомассивы из ПГС и ЩС в вибросформированных скважинах применяются в любых рыхлых песчаных грунтах [2].

Если фундамент (монолитный или сборный, столбчатый или ленточный) промышленного здания или сооружения опирается на геомассив с применением ПГС и ЩС, проектную нагрузку на грунт основания можно передать при меньших размерах подошвы фундамента за счет уплотнения основания, повышения его жесткости, прочности и уменьшения деформативности. Помимо сплошных геомассивов, создаваемых для общеплощадного укрепления грунтов, часто устраивают одиночные, или кустовые (под столбчатые фундаменты), и ленточные (под ленточные фундаменты) геомассивы [3].

Научные исследования и накопленный опыт строительства промышленных объектов подтверждают эффективность ПГС и ЩС при возведении промышленных объектов с нагрузками до 5000 кН на фундамент. Одним из ярких примеров практического применения данной технологии являются фундаменты главного производственного корпуса ОАО «Гомельстекло» и цеха ОАО «Спартак» в Гомеле [2].

Литература

1. Винокуров Е.Ф., Карамышев А.С. *Строительство на пойменно-намывных основаниях*. Минск, Высшая школа, 1980. 206 с.
2. Галкин А.Н. *Инженерная геология Беларуси: в 3 ч. Ч. 1: Грунты Беларуси / под науч. ред. В.А. Королева*. Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова, 2016. 367 с.
3. Галкин А.Н., Акулевич А.Ф., Павловский А.И., Галезник О.И. *Техногенные грунты*. Минск, Высшая школа, 2020. 192 с.
4. Лях В.Н. *Опыт применения фундаментов на насыпных основаниях при строительстве зданий ледовых дворцов в Республике Беларусь // Строительная наука и техника*. 2011. № 2. С. 23–33.
5. *Фотогалерея*. Belarusinfo.by – Интерактивная поисковая система. URL: <https://www.belarusinfo.by/ru/poisk/7409.html> (дата обращения 19.11.2024)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАССИВОВ РАСТВОРИМЫХ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ ПОЛЕВЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

М.В. Коробов, А.В. Аникеев

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, Россия, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2
E-mail: korobovmv88@gmail.com, anikeev_alex@mail.ru

Качество расчетов устойчивости массива грунтов и, в конечном итоге, адекватность и точность получаемых при этом результатов зависят от полноты и надежности исходных данных. К последним относятся данные полевых и лабораторных работ о строении и свойствах исследуемого массива. В статье рассматривается возможный вариант определения прочностных характеристик массива растворимых скальных и полускальных грунтов на основе эмпирических зависимостей модели Хоека-Брауна.

В аналитических расчетах и математических моделях устойчивости закарстованных территорий, как и склонов, в качестве прочностных показателей используются сцепление (c) и угол внутреннего трения (φ) грунтов [1, 9]. В районах голого, задернованного или прикрытого карста, практически целиком сложенных скальными и полускальными грунтами, получение этих показателей представляет серьезную проблему.

При стандартных исследованиях таких грунтов обычно устанавливается их прочность на одноосное сжатие в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии [8]. Снятие показателей c и φ с кривой Кулона-Мора, построенной по результатам лабораторных испытаний образцов (трехосное сжатие, одноосное сжатие и растяжение, «бразильский метод» и др.) таких грунтов приводит к необоснованному завышению свойств массива из-за масштабного эффекта [5].

Объектом исследования служил массив-основание Памятника Салавату Юлаеву в г. Уфе Республики Башкортостан. Здесь в 2023–2024 гг. выполнялись работы по сохранению этого объекта культурного наследия федерального значения.

Памятник расположен на бровке коренного эрозионного склона р. Белая южной экспозиции с абс. отметкой 186,0 м. Средняя крутизна склона – 33° , перепад высот – 105 м. Сверху вниз по склону выделяются: площадка памятника и прилегающая благоустроенная территория, залесенный участок с редкими выходами пород на поверхность и крутой хорошо обнаженный участок (рис. 1).



Рис. 1. Участок работ (точки наблюдения – красным, скважины – синим)

Склон сложен нижнепермскими отложениями иренского горизонта кунгурского яруса ($P_1 kg^{ir}$), а также соликамского ($P_1 u^{sl}$) и шемшинского ($P_1 u^{ss}$) горизонтов уфимского яруса [2, 6]. С поверхности местами залегают маломощные техногенные грунты (tQ_{IV}). Пермские отложения в боль-

шинстве своем представлены сульфатными и терригенно-карбонатными скальными и полускальными породами (рис. 2).



Рис. 2. Геолого-литологический разрез: P_1kg^{ir} – пермская система нижний отдел кунгурский ярус иренский горизонт, P_2u^{sl} , P_2u^{ss} – пермская система нижний отдел уфимский ярус соликамский и шемшинский горизонт соответственно, 1 – насыпные отложения, 2 – глины, 3 – песчаники, 4 – алевролиты, 5 – мергели, 6 – доломиты, 7 – известняки, 8 – гипсы, 9 – переслаивающиеся терригенные, карбонатные и сульфатные породы нерасчлененные

Гидрогеологические условия участка определяются близким расположением крупной региональной дрены – р. Белая. Глубина залегания уровня подземных вод от бровки склона составляет 100 м и более.

Исследования включали в себя анализ архивных материалов изысканий на этом участке, полевые и лабораторные работы. В ходе полевых работ выполнены маршрутные рекогносцировочные наблюдения с проходкой открытых горных выработок (шурфов, закопшек), отбором образцов грунтов и описанием обнажений горных пород.

Для определения прочностных характеристик массива грунтов использовался метод Хоека-Брауна (табл. 1), разработанный для открытых горных выработок [3, 10] и также нашедший применение при описании образцов скальных грунтов, отобранных из скважин. В настоящее время нелинейный критерий прочности Хоека-Брауна активно используется как в научных исследованиях [4], так и в производственной деятельности [3].

| Основные уравнения и параметры модели Хоека-Брауна [3] | | Таблица 1 |
|--|--|-----------|
| Основные уравнения | Пояснение | |
| $f_{HB} = \sigma'_1 - \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{-\sigma'_3}{ \sigma_{ci} } + s \right)^a$ | Функция текучести | |
| $\sigma'_1 = \sigma'_3 - \sigma_{ci} \left(m_b \frac{-\sigma'_3}{ \sigma_{ci} } + s \right)^a$ | Обобщенный критерий разрушения | |
| $m_b = m_i e^{\frac{(GSI-100)}{28-14D}}$ | Безразмерные параметры, зависящие от минералогического состава и состояния горной породы | |
| $s = e^{\frac{(GSI-100)}{9-3D}}$ | | |
| $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[e^{\frac{(-GSI)}{15}} - e^{\frac{(-20)}{3}} \right]$ | | |
| $\sigma_{сж} = - \sigma_{ci} s^a$ | Предел прочности массива на одноосное сжатие | |
| $\sigma_p = \frac{s \sigma_{ci} }{m_b}$ | Предел прочности массива на одноосное растяжение | |
| σ_{ci} – прочность образца на одноосное сжатие; m_i – параметр литологии; GSI – геологический индекс прочности; D – коэффициент нарушения | | |

Из табл. 1 видно, что предел прочности на одноосное сжатие и растяжение в модели Хоека-Брауна определяется исходя из основного уравнения функции текучести при $\sigma_3 = 0$ [10, 11], а ее параметрами служат:

- прочность на одноосное сжатие ненарушенного грунта (лабораторно);
- индекс GSI (геологический индекс прочности), устанавливается по характеру трещиноватости массива – расстоянию между трещинами и состоянию поверхности трещин (рис. 3), а при вскрытии грунтов бурением ориентировочно по значению RQD. Этот параметр оказывает наибольшее влияние на результаты количественной оценки устойчивости склонов [4];
- параметр ненарушенной породы m_i (имеются табличные значения для каждого литологического типа горных пород [3]);
- коэффициент нарушения D (в условиях отсутствия разработки горных пород =0).

В качестве примера рассмотрим определение прочностных характеристик одного из выделенных слоев (см. рис. 1), вскрытого бурением и описанного также в обнажении. Грунты слоя представлены гипсом слоистым мощностью отдельных слоев 1-2 см. Породы слаботрещиноватые, блочной структуры с 1-й выделенной системой трещин. Расстояние между трещинами до 0,3 м, поверхность трещин гладкая, средневыветрелая, слегка измененная (рис. 4). Согласно рис. 3 значение индекса GSI такого грунта составляет 60.

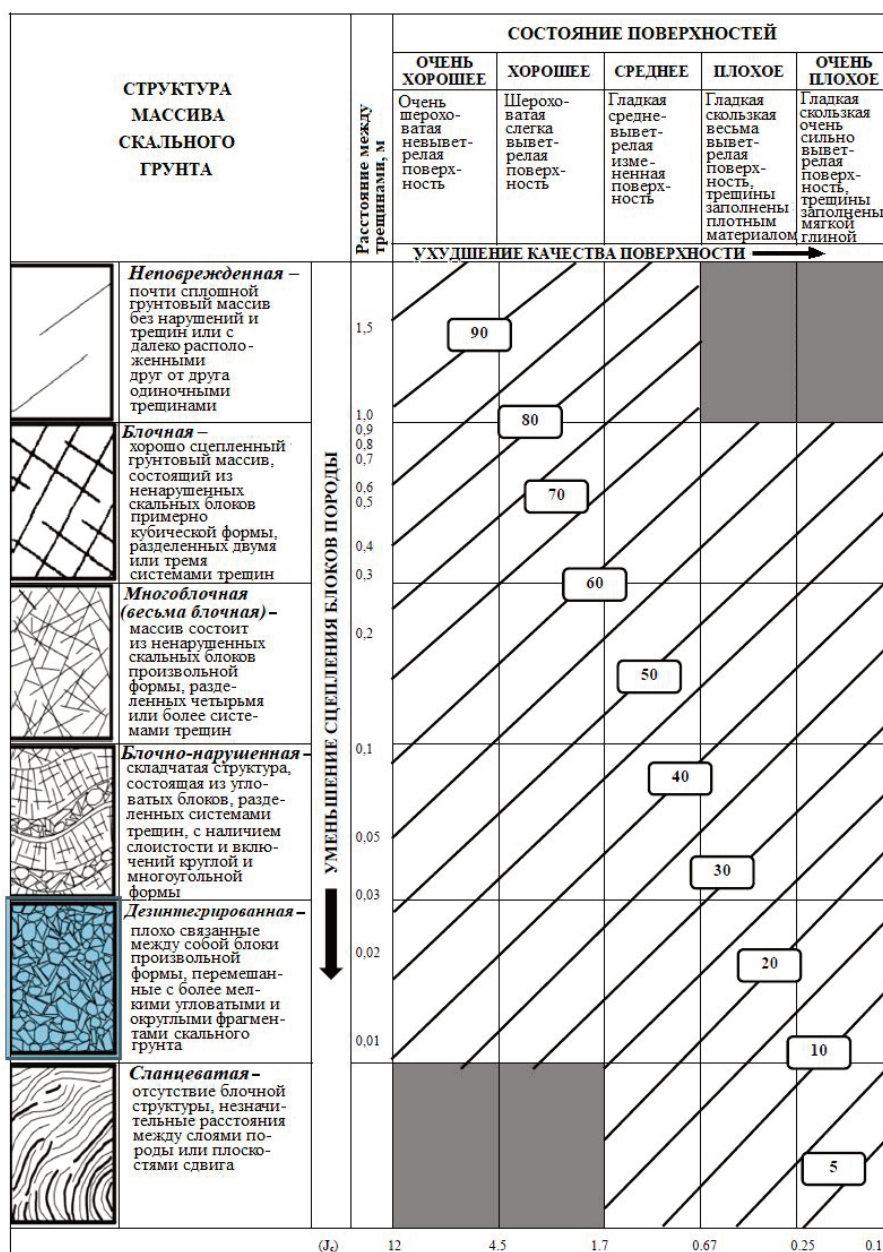


Рис. 3. Определение GSI – геологического индекса прочности [3]



Рис. 4. обнажение горных пород

По результатам лабораторного исследования образцов гипса, отобранного из рассматриваемого слоя, его прочность на одноосное сжатие составляет $\sigma_{ci} = 22,2$ МПа. Безразмерный параметр ненарушенной породы m_i для гипса, согласно [3], равен 8.

Используя полученные выше значения GSI, m_i и σ_{ci} , рассчитываем прочность на одноосное сжатие и растяжение массива согласно формулам на рис. 3:

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} = 8 * e^{\frac{60-100}{28-14*0}} = 8 * 0,24 = 1,92$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} = e^{\frac{60-100}{9-3*0}} = 0,012$$

$$a = 0,5 + \frac{1}{6} (e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}}) = 0,5 + \frac{0,01704}{6} = 0,50$$

$$\sigma_{сж} = -|\sigma_{ci}|s^a = -22,2 * 0,012^{0,5} = 2,38$$

$$\sigma_p = \frac{s|\sigma_{ci}|}{m_b} = \frac{0,012 * |22,2|}{1,92} = 0,14$$

Таким образом, полученные значения прочности массива на одноосное сжатие отличаются практически на порядок от значений для образца. Далее согласно теории прочности Мора, по методике ГОСТ 21153.8 (табл. 2) [7], строим огибающую для кругов и с которой снимаем значения сцепления (C) и угла внутреннего трения (φ) гипсов:

| Расчетный метод построения паспорта прочности [7] | | | | | Таблица 2 |
|---|---------------|---------------------|------------------------|----------------------|-----------|
| $q_2/q_1 = \sigma_{сж}/\sigma_p$ | q_2 (табл.) | $K_1 + q_1$ (табл.) | $a = \sigma_{сж}/2q_2$ | $q_0 = a(K_1 + q_1)$ | |
| 17 | 0,0701 | 0,0083 | 16,98 | 0,141 | |

Пары значений σ и τ огибающей кривой находим при помощи безразмерных координат K и l, [7]. С полученной огибающей кривой снимаем значения сцепления $C=0,34$ МПа и угла внутреннего трения $\varphi=59^\circ$ (рис. 5).

В ходе исследований по результатам маршрутной геологической съемки и анализа архивных материалов изучено строение массива. По описанному методу с применением модели Хоека-Брауна и теории прочности Кулона-Мора определены прочностные характеристики скальных и полускальных грунтов, слагающих основание реконструируемого памятника.

По полученным данным была выполнена количественная оценка устойчивости склона в программе Midas GTS NX. Моделирование выполнялось методом снижения прочности (SRM) с ис-

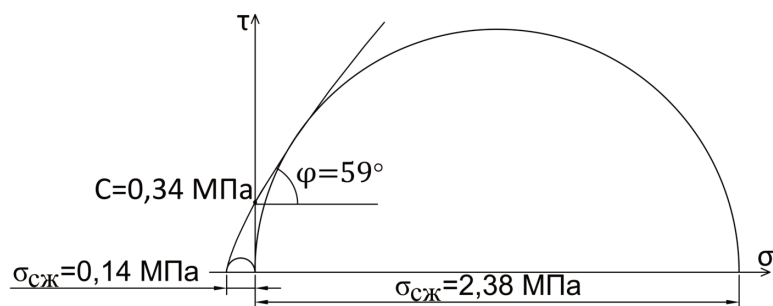


Рис. 5. Предельные круги напряжений и предельная огибающая для описываемого слоя.

пользованием теории прочности Кулона-Мора – в качестве исходных данных выступают сцепление (С) и угол внутреннего трения (φ). На рис. 6 представлено распределение пластических деформаций с концентрацией в потенциальной поверхности скольжения. По расчетам получен высокий коэффициент устойчивости склона - 2,75. Результаты оценки согласуются с отсутствием проявлений склоновых процессов при рекогносцировочном обследовании (трещин и др.).

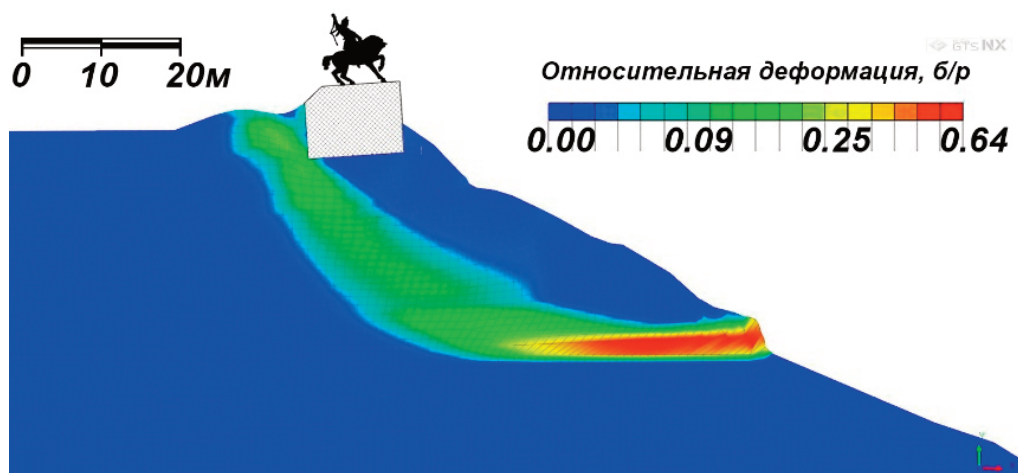


Рис. 6. Изополя распределения пластических деформаций

Описываемый авторами подход позволяет эффективно и быстро определять прочность массивов скальных грунтов с учетом масштабного эффекта. Это может быть полезно при масштабных исследованиях – например, при картировании больших территорий районов голого карста.

Литература

1. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска: монография / А. В. Аникеев. Москва: РУДН, 2017.
2. Геологическая карта СССР. Геологическая карта и карта полезных ископаемых дочетвертичных образований. Масштаб 1:200 000. Средневожская серия. Лист N-40-VIII. Башкирское территориальное геологическое управление, 1967.
3. Иовлев Г.А. Модель Хука – Брауна с разупрочнением сделает геотехнические решения более надежными // ГеоИнфо. 11.12.2024. URL: <https://geoinfo.ru/product/iovlev-grigorij-alekseevich/model-huka-brauna-s-razuprochneniem-sdelaet-geotekhnicheskie-resheniya-bolee-nadezhnymi-46728.shtml>
4. Кан К., Зеркаль О.В., Пономарёв А.А., Фоменко И.К. Вероятностный анализ устойчивости склонов на основе обобщенного критерия Хюка-Брауна при сейсмическом воздействии // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2021. №3. С. 11-16.
5. Королев В.А. Теоретическая оценка масштабного эффекта в дисперсных грунтах // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2017. №6. С. 77-86
6. Состояние изученности стратиграфии докембрия и фанерозоя России. Задачи дальнейших исследований. Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. Вып. 38. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008.

7. ГОСТ 21153.8-88 ПОРОДЫ ГОРНЫЕ «Метод определения предела прочности при объемном сжатии», М.: Издательство стандартов, 1988, Приложение 3.
8. СП 446.1325800.2019 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ». М. 2019, Приложение Л.
9. СП 499.1325800.2021 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-суффозионных процессов. Правила проектирования. М. 2021, Приложение А.
10. Hoek E., Brown E.T. The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update // Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed. J.C. Curran), Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto, 1988, P.:31-38.
11. Hoek E., Carranza-Torres C.T., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition // In: Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symp., Toronto, Canada, 2002. - Vol. 1. – P: 267-273.

ОЦЕНКА СЛОИСТЫХ ГРУНТОВЫХ ТОЛЩ, КАК ПРИРОДНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Н. Кутергин, С.И. Фролов

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, Россия, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2
E-mail: kvan20@bk.ru

Грунтовые толщи весьма неоднородны по строению, составу и свойствам. Присущая им гетерогенность является одной из важных черт, характерных для, так называемых, композитных материалов.

Рассматривая массив грунтов, как набор макрослоёв или макроотдельностей, составляющих единую толщу, можно найти ряд особенностей, свойственных гетерогенным материалам, которые в материаловедении характеризуют, как композитные.

Как известно, композитом называют неоднородный (гетерогенный) материал, представляющий собой объёмное сочетание двух и более компонентов с границей раздела (поверхностью контакта), либо с промежуточным межфазным слоем. Гетерогенные составляющие композита представлены *матрицей* (связующим материалом или наполнителем) и *армирующими* элементами. Последние, обладающие более высокой жесткостью, различным образом распределены в объёме или образуют пространственный каркас.

Композиционные материалы характеризуются свойствами, которыми не обладают компоненты в отдельности. Матрица определяет физико-механические свойства композита, армирующие элементы могут их изменять в зависимости от объёмного содержания компонентов. При этом важным фактором является также характер возможного взаимодействия между ними.

Принимая все отмеченные особенности композитов свойственными для грунтовых толщ, среди них можно выделить следующие характерные типы.

Слоистый грунтовый композит представляет собой чередование макрослоев, каждый из которых состоит из пород определенного состава, плотности, прочности и деформируемости. Это, например, всемерно распространенные толщи дисперсных глинистых и песчаных грунтов. Также характерным примером таких слоистых систем, включающих макрослои с резко отличающимися свойствами, может служить толща (флиш), так называемой, таврической свиты.

Зернистый грунтовый композит может быть представлен, как чередование зернистого материала разного размера и степени окатанности. Роль наполнителя могут исполнять зерна меньшего размера, роль армирующего элемента - более крупные и жесткие включения. Например, толщу моренных грунтов можно рассматривать, как композит, включающий в себя матрицу из дисперсного заполнителя и более прочные армирующие обломочные включения.

Блочный грунтовый композит, типичным представителем которого может служить элювий скальных пород, представляющий собой блоки обломков, пространство между которыми заполнено дисперсным материалом.

Жильно-блочный грунтовый композит может быть таким же по строению, однако блоки в данном случае образует дисперсная матрица, а арматурный каркас – жилы из жесткого, (например цементного), материала. Такое строение обычно могут иметь массивы искусственного происхождения (геокомпозиты), выполненные средствами и методами технической мелиорации.

Как характерный пример массива, имеющего черты слоистых природных композитов, может служить рассмотренная нами толща, так называемых, “воскресенских глин”.

Грунтовый массив воскресенской подсвиты кривякинского горизонта касимовского яруса верхнекаменноугольной системы (С₃vs) представляет собой нерегулярное чередование слоев пестроцветных дисперсных связных грунтов (преимущественно красного, вишневого и бордового цвета) и слоев скальных пород. Скальные породы представлены доломитами, известняками и мергелями. Эту толщу можно рассматривать как массив, включающий макрослои с резко отличающимся составом, состоянием, деформируемостью и прочностью.

Достоверная оценка свойств этих пород является важной, поскольку они используются как основания для возводимых в г. Москве сооружений повышенной этажности. Повышенные нагрузки

до 1,0 МПа обуславливают наличие глубокой зоны активного сжатия, в которую попадают эти макрослои с существенно различными характеристиками.

Объектами исследований были образцы пород площадок строительства района Москва-Сити.

Испытания дисперсных и скальных образцов пород были выполнены в приборах трехосного сжатия СТ-10 и 45-D0556 Controls по схемам консолидированно-дренированного нагружения. Отдельная серия выполнялась по специальной схеме с разгрузкой и повторной нагрузкой, моделирующей процесс выемки грунта из котлована с последующим действием нагрузки от сооружения.

Нормативное значение модуля общей деформации для дисперсных пород (рис.1а) составило $E_{O1} = 20,2$ МПа, для скальных (рис.1б) - $E_{O2} = 1040$ МПа. Для образцов, представлявших собой различные композиционные сочетания скальных и дисперсных пород, были получены значения характеристик сжимаемости в зависимости от соотношения компонентов.

Для оценки соотношения матричных слоев грунтов терригенного происхождения и армирующих толщ слоев карбонатных пород выполнялось растривание цветных фотографий образцов пород (рис. 1в). Определение границ раздела слоев, количества пикселей (элементов изображения) в пределах каждой выделенной зоны позволило достаточно точно определить их процентное соотношение.

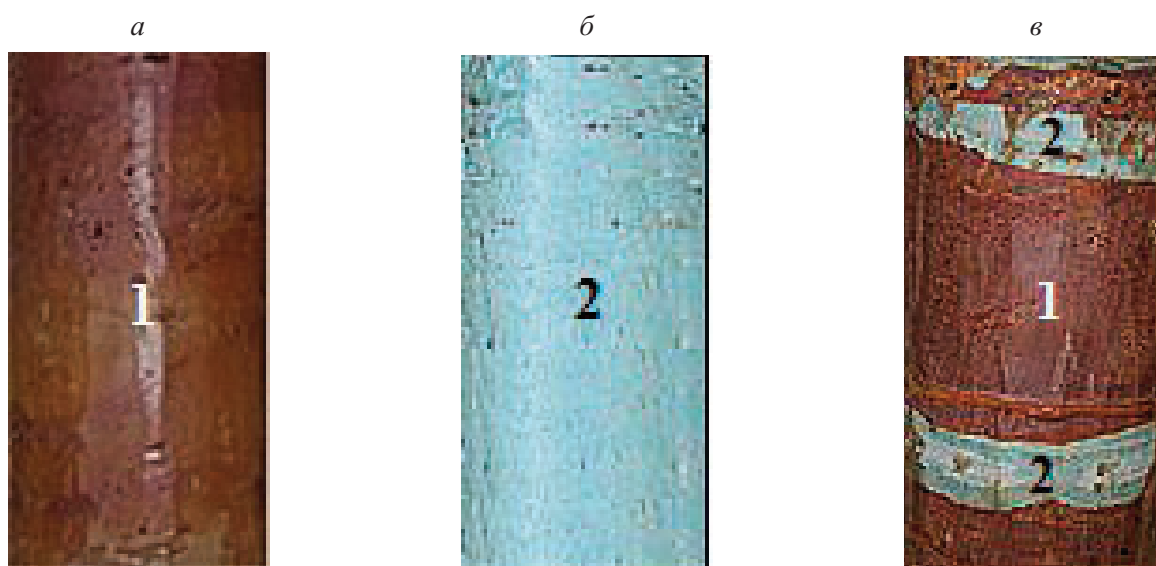


Рис. 1. Фотографии образцов для трехосных испытаний (а – дисперсный грунт; б – скальный грунт; в – характерный образец породы для определения соотношения пикселей изображения, где 1 – дисперсная матрица; 2 – армирующие скальные слои)

По имеющейся геологической колонке, составленной на основе сплошного отбора и анализа образцов керна, результаты определения процентного соотношения композитных слоев были выполнены для всей толщи мощностью до 11 м. Соотношение слоев выражалось в виде коэффициента α , представляющего собой отношение содержания терригенного материала в образце к общему содержанию грунтовых частиц. Общая деформируемость образца характеризовалась значением модуля общей деформации композита в целом E_{OK} . На рисунке 2а представлены полученные результаты определения деформируемости “воскресенских глин” в виде зависимости модуля общей деформации E_{OK} образцов грунтов от относительного содержания терригенного материала (коэффициента α).

Использование для описания зависимости наиболее известного «правила смесей» (или формулы А.Г.Тархова) [3], дают кривую 2 весьма далекую от экспериментальных значений. Из известных теоретических и эмпирических зависимостей наиболее близка к экспериментальным данным в интервале $\alpha \approx 0,70-1,00$ модифицированная зависимость Р. Кристенсена [1] (кривая 3).

В рассмотренной композитной системе, свойства составляющих элементов которой значительно отличаются друг от друга, для наиболее жесткого армирующего слоя можно принять постоянным значение $E_{O2} = 1040$ МПа при различных сочетаниях компонентов. Для наиболее “мягкой” составляющей характеристики деформируемости могут меняться при различных соотношениях матрицы

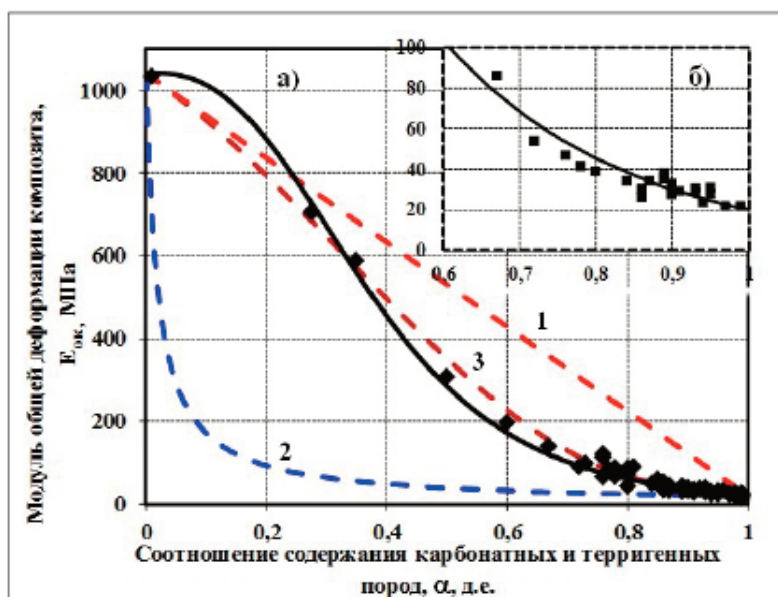


Рис. 2. Зависимости модуля общей деформации ЕОК от относительного содержания терригенного материала, α [а) 1 – рассчитанные как средневзвешенные ЕОК срвзв; 2 – по ф-ле Тархова («обратное правило смеси»); 3 – по модифицированной ф-ле Кристенсена; –■– по результатам экспериментов; б) по результатам экспериментов для диапазона $\alpha = 0,6 - 1,0$]

и армирующих карбонатных слоев. Это изменение в диапазоне значений $\alpha = 0,6 - 1,0$ (рис. 2б), можно описать экспоненциальной функцией:

$$E_{O1} = A \cdot e^{-m \cdot \alpha}, \quad (1)$$

где A , m – константы материала.

Приняв за основу формулу А.Г. Тархова и учитывая (1), получаем зависимость (рис. 2а), удовлетворительно описывающую изменение полученных в экспериментах значений E_{OK} , как функцию α :

$$\frac{1}{E_{OK}} = \frac{1-\alpha}{E_{O2}} + \frac{\alpha}{E_{O1}} = \frac{1-\alpha}{E_{O2}} + \frac{\alpha}{A \cdot e^{-m \cdot \alpha}}. \quad (2)$$

Используя эту зависимость, с учетом соотношений содержания карбонатного и терригенного материала α рассчитаны значения модулей общей деформации композитных пород E_{OK} для раз-

| Таблица 1 | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Поинтервальная оценка характеристик деформируемости слоистой композитной толщи по глубине | | | | | | | | | | |
| Характеристика | в интервалах глубин, м | | | | | | | | | |
| | до 1,0 | до 2,0 | до 3,0 | до 4,0 | до 6,0 | до 8,0 | до 9,0 | до 10,0 | до 11,0 | до 11,2 |
| α | 0,48 | 0,59 | 0,60 | 0,64 | 0,64 | 0,60 | 0,59 | 0,61 | 0,62 | 0,60 |
| ЕОК ,МПа | 317 | 184 | 176 | 143 | 144 | 173 | 178 | 167 | 160 | 171 |
| ЕОК срвзв,МПа | 547 | 437 | 428 | 388 | 389 | 424 | 431 | 418 | 409 | 422 |

личных интервалов глубин в пределах толщи “воскресенских глин”. Результаты выполненной оценки приведены в таблице 1.

Значение модуля общей деформации при прогнозируемом сжатии всей толщи “воскресенских глин” оценивается в 171 МПа, а по глубинным интервалам E_{OK} изменяется от 143 до 317 МПа. Оценка E_{OK} для разных глубин может быть использована при расчетах деформируемости толщи в пределах активной зоны сжатия, определяемой величиной нагрузки от сооружения. Как видно из таблицы, использование метода расчёта со средневзвешенными значениями E_{OK} срвзв дает более высокие результаты.

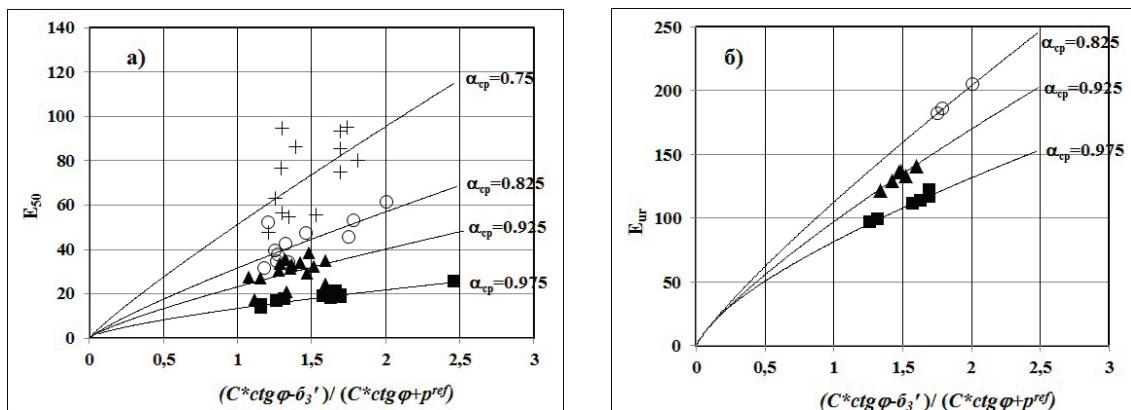


Рис. 3. Зависимости для определения параметров модели упрочняющегося грунта кластеров с различными значениями α_{cp}

Для выборок (совокупностей) образцов со значениями показателей α , заключенными в интервалах: 0,95–1,00; 0,90–0,95; 0,75–0,90 были также получены параметры, используемые при расчетах по модели упрочняющегося грунта HSM (*Hardening Soil Model*). Они представлены на рис.3 в виде зависимостей

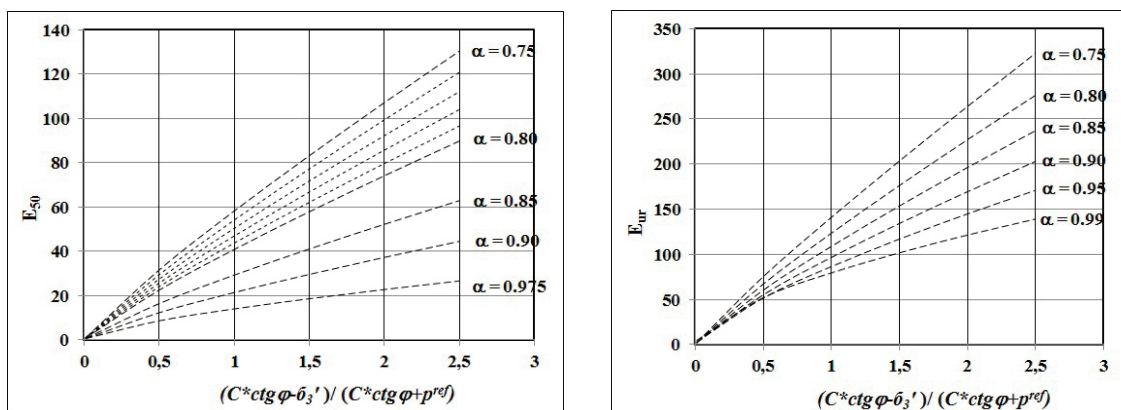


Рис. 4. Номограммы для определения параметров модели упрочняющегося грунта кластеров с различными значениями α

E_{50}, E_{ur} и $\frac{C^* \cdot ctg\varphi - \sigma_3'}{C^* \cdot ctg\varphi + p_{ref}}$ при различных средних по вышеуказанным интервалам значений показателя α (α_{cp}).

По полученным данным построены также номограммы вышеупомянутых зависимостей для различных значений α , т.е. различных сочетаний дисперсной матрицы и армирующих скальных пород (рис. 4).

* * *

Рассмотрение грунтовых толщ, как природных композитов, открывает новые возможности для оценки их свойств.

Массивы характеризуются значительными отличиями свойств составляющих их грунтовых материалов, при этом каждый из них вносит свое качество в определенной пропорции. Если вклад свойства какого-либо компонента в свойство композита пропорционален его содержанию, то такое свойство является аддитивным. Зависимости свойств композита от содержания составляющих в этом случае определяются по формуле арифметического средневзвешенного, либо по «обратному правилу смеси» А.Г.Тархова. Однако, проявление свойств грунтового композита носит неаддитивный характер и поведение комплекса в целом во многом определяется взаимодействием и взаимовлиянием друг на друга его составляющих, в частности, контактными мембранно-изгибными взаимодействиями [2]. Для слоистой толщи «воскресенских глин», с анализом соотношения составляющих её макрослоев, получена зависимость, отражающая это взаимовлияние.

Существенные изменения характеристик в пределах толщ вызывают затруднения в использовании различных полевых методов исследования. Так, например, испытания пробными нагрузками (штампами) не позволяют охватить и охарактеризовать в целом всю зону активного сжатия слоев, возникающую при повышенных нагрузках от сооружений. При этом, установка штампа на макрослой с преобладанием скальных пород, даёт завышенные значения модуля общей деформации E_0 для толщи в целом; на макрослой дисперсных грунтов - заниженные результаты определения E_0 .

Таким образом, представляется, что достоверная оценка свойств грунтовых толщ, как природных композитов, может быть дана на основе предложенного и использованного методического подхода. Его суть составляет комплексный анализ строения (соотношения составляющих) природных композитных толщ и механических свойств макрослоев или макроотдельностей рассматриваемой толщи, полученных при лабораторных испытаниях в условиях трехосного сжатия.

Литература

1. Кристенсен Р. Введение в механику композитов.-М.: Мир, 1982, 334 с.
2. Рейфснейдер К. Повреждение конструкций из композитов в процессе эксплуатации // В сб. Прикладная механика композитов под редакцией Ю.М. Тарнопольского.-М.:Мир, 1989 , с. 108-142.
3. Тархов А.Г. К вопросу об анизотропии упругих свойств в горных породах // Материалы ВСЕГЕИ. Общая серия. 1940, № 5, с. 209-222.

МАССИВЫ ЭЛЮВИАЛЬНЫХ ГРУНТОВ КАК ОСНОВАНИЯ ЗДАНИЙ ВЫСОТНОЙ КОНСТРУКЦИИ (ЕКАТЕРИНБУРГ)

О.Н. Овечкина¹, В.В. Фуникова², А.В. Тверяков¹

¹ ООО Научно-исследовательский центр «СтройГеоСреда»,
620034, г. Екатеринбург, ул. Бебеля, 17, оф.722
E-mail: oon5316@mail.ru

² МГУ им. М.В. Ломоносова, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет
E-mail: funikovavv@my.msu.ru

Город Екатеринбург входит в число лидеров России по количеству и темпам возведения зданий высотной конструкции, занимая третье место после Москвы и Санкт-Петербурга. Бум строительства пришелся на XXI век, и в 2024 году количество зданий этажности 20+ превысило 500 (более 55 из них 30+).

Проблемы обеспечения надежности оснований высотных зданий при их проектировании и строительстве занимают особое место, поскольку давление под фундаментной конструкцией может превышать 0,5–0,8 МПа, а в активную зону влияния сооружения вовлекаются в работу большие массивы грунтов, как правило, неоднородные по простиранию и глубине даже в пределах одного строительного объекта. Наиболее благоприятными грунтами оснований высотных зданий являются массивы скальных пород, а в случае большой мощности дисперсных грунтов, особенно глинистых, возможность высотного строительства определяется технологиями. Как правило, наиболее часто рассматриваются комбинированные плитно-свайные или плитные фундаменты.

Инженерно-геологические условия г. Екатеринбурга сформировались в процессе длительной и сложной истории геологического развития Уральского орогена, что обусловило широкое распространение грунтов различного состава, возраста и генезиса [1]. В инженерно-геологическом отношении территория г. Екатеринбурга имеет двухъярусное строение. Нижний ярус представлен скальными грунтами различного состава и возраста. Верхний ярус сложен рыхлыми песчано-глинистыми, обломочными образованиями мезозоя и отложениями четвертичного возраста (аллювиальными, делювиальными, озерно-болотными, болотными и техногенными). Таким образом, в верхней части разреза скальные палеозойские породы в результате процессов физического и химического выветривания в мезо-кайнозойское время преобразовались в суглинки и глины (реже супеси и дресву) коры выветривания мощностью от первых метров (на гранитных и габбровых массивах) до первых десятков метров (в карманах выветривания, развившихся по метаморфическим породам и по контактам пород разного состава и возраста), которые являются основанием многих сооружений [2].

Объектом исследования являлись элювиальные глинистые грунты территории строительства жилого комплекса «КОСМОС» в г. Екатеринбурге, состоящего из комплекса зданий, шесть из которых относятся к жилым высотным зданиям с этажностью от 25 до 33.

Участок расположен в зоне развития элювиальных грунтов коры выветривания нижнесилурийских метаморфизованных эффузивных пород кировградской свиты (S_{1w}), представленных порфиритами расланцованными зеленовато-бурого цвета, различной степени выветривания (от сильно-выветрелых до слабовыветрелых разновидностей), прочности (от средней до низкой прочности), с суглинистым заполнителем по трещинам. Кровля скальных грунтов носит неровный, пикообразный характер, встречена на глубинах от 5,3 м и более, а в части выработок до глубины 25 м так не была вскрыта (рис. 1).

Дисперсная зона коры выветривания порфиритов, образованная при более глубоком химическом преобразовании исходных скальных пород, представлена элювиальными суглинками желтовато-коричневого, серовато-зеленого, желтовато-серого цвета, от полутвердой до твердой консистенции, с включением дресвы и щебня, линз кварца, участками суглинками дресвяными (обломков до 30%), с «гнездами» сильновыветрелых порфиритов низкой и весьма низкой прочности. Кровля суглинков относительно ровная и зафиксирована на глубинах от 1,4 до 7,8 м. Мощность суглинков варьирует от 2,1 до 22,0 м и более, т.к. некоторыми скважинами до глубины 25 м подошва слоя не была вскрыта. Вверх по разрезу элювиальные грунты перекрываются аллювиально-делювиальными суглинками (мощностью от 0,6 до 4,5 м) и выше – насыпными грунтами (мощностью от 0,2 до 6 м).

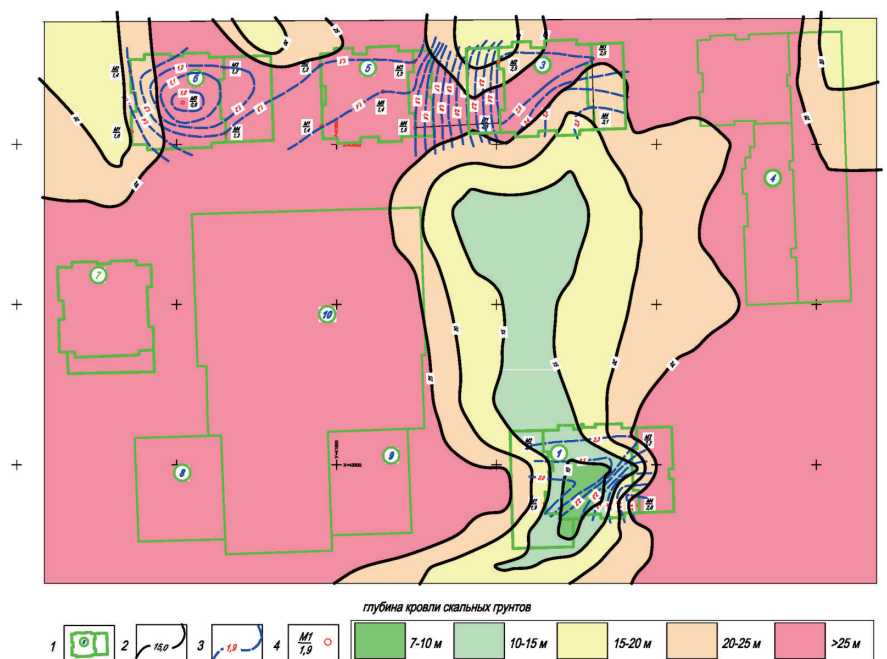


Рис. 1. Схематическая карта глубины залегания кровли скальных пород территории строительства ЖК «Космос»: 1 – контур и номер строительного объекта, 2 – изолинии залегания кровли скальных пород, 3 – изолинии осадки зданий за весь период мониторинга, 4 – номер геодезической марки (в числителе), 5 – максимальная осадка, см (в знаменателе)

Продукты выветривания пород кировградской свиты детально были изучены Подкорытовой Л.И. [3]. В результате комплексного изучения вещественного состава, строения и свойств элювиальных грунтов коры выветривания пород данной свиты выявлен гидрослюдисто-монтмориллонит-каолинитовый профиль. По классификации Л.А. Ярг [4] профиль коры выветривания представлен в следующем виде: 1) глыбовая зона (IIa), представлена скальными грунтами от слабывветрелых до сильновыветрелых, вскрытой мощностью более 30 м; и 2) дисперсная зона (IV) – представлена суглинками, реже глинами мощностью от 0,6 м до более 15 м. Таким образом, в разрезе коры выветривания скального массива исследуемого участка можно выделить дисперсную зону (суглинок) и локально – глыбовую (рухляк).

Уровень подземных вод зафиксирован на глубине 4,4-5,5 м, подземные воды типа «верховодка» отмечены на глубине 3,0, территория относится подтопленной в техногенно измененных условиях.

Экспериментальные исследования были проведены на образцах (более 150) природного и нарушенного сложения.

В минеральном составе дисперсной зоны (табл. 1) отмечено отсутствие каких-либо явных закономерностей изменения по разрезу, что свидетельствует о неоднородности процессов, протекающих в результате химического выветривания. Однако можно отметить снижение содержания породообразующих минералов плагиоклаза и слюды снизу вверх по разрезу, соответственно, и увеличение гидрослюдистых и глинистых минералов, что выражается в количественном увеличении вермикулита, а также смектита и каолинита.

По значению числа пластичности и гранулометрическому составу суглинки коры выветривания относятся к лёгким и тяжелым, песчанистым и пылеватым. По степени набухания - в целом, слабонабухающие, но в отдельных случаях – ненабухающие или сильнонабухающие. Характеризуются неоднородным составом, строением и изменчивостью свойств (табл. 2) как по глубине, так и по простиранию.

Учет неодинаковой сжимаемости элювиальных грунтов, которые часто служат основанием высотных зданий на территории г. Екатеринбурга, является неременным условием обеспечения надежной работы фундаментов высотных зданий. Добиться одинаковой осадки фундаментов не всегда удастся даже путем изменения передаваемых на основание давлений. В связи с этим предусматривают устройство фундаментной плиты (на исследуемом участке монолитная железобетонная плита толщиной 140 см для 25-ти этажных зданий и 100 см для 19-ти этажных) на искусственном основании, сложенном скальным грунтом фракцией 70÷150 мм (максимально допустимый размер

| Таблица 1 | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|------------------------------------|------------|----|---------|--------|---------|-------|----------|------------|---------|
| Минеральный состав элювиальных глинистых грунтов | | | | | | | | | | | |
| Номер образца | Глубина отбора, м | Минеральный состав (прибл. вес, %) | | | | | | | | | |
| | | кварц | плагиоклаз | КЩ | доломит | эпидот | амфибол | слюда | каолинит | вермикулит | смектит |
| 1 | 5,6-5,8 | 19 | 5 | 7 | 3 | | | | 32 | 34 | |
| 2 | 6,8-7 | 9 | 12 | 7 | 4 | 8 | | 8 | 28 | 17 | 7 |
| 3 | 8,8-9,0 | 9 | 18 | 5 | 3 | 4 | | 13 | 26 | 22 | |
| 4 | 10,7-10,9 | 12 | 14 | 4 | 3 | 10 | | 16 | 18 | 10 | 13 |
| 5 | 12,7-13,0 | 14 | 12 | 3 | 3 | 22 | | 10 | 15 | 12 | 9 |
| 6 | 15,2-15,5 | 1 | 22 | 7 | | 14 | 4 | 11 | 9 | 26 | 6 |
| 7 | 19,5 | 24 | 23 | 4 | <1 | | | 18 | 9 | 13 | 9 |

| Таблица 2 | | |
|---|--|------------|
| Диапазон изменения значений показателей свойств элювиальных глинистых грунтов | | |
| Показатели свойств | Диапазон изменения значений показателей физических и физико-механических свойств | |
| Природная влажность, д. ед. | 0,199 ÷ 0,404 | |
| Влажность на границе текучести, д. ед. | 0,271 ÷ 0,500 | |
| Влажность на границе раскатывания, д. ед. | 0,191 ÷ 0,375 | |
| Число пластичности, % | 0,075 ÷ 0,180 | |
| Показатель текучести | -0,98 ÷ 0,46 | |
| Плотность, г/см ³ | 1,81 ÷ 2,16 | |
| Коэффициент пористости, | 0,53 ÷ 1,093 | |
| Удельное сцепление при естественной влажности, МПа | 0,015 ÷ 0,046 | |
| Угол внутреннего трения при естественной влажности, град. | 16 ÷ 28 | |
| Компрессионный модуль деформации, МПа, в интервале нагрузок: | 0,1-0,2 МПа | 2,5 ÷ 7,7 |
| | 0,2-0,3 МПа | 3,9 ÷ 10,2 |
| | 0,3-0,4 МПа | 4,2 ÷ 17,0 |
| Одометрический модуль деформации, МПа, в интервале нагрузок, МПа | 0,1-0,2 МПа | 4,1 ÷ 20,7 |
| | 0,2-0,3 МПа | 6,4 ÷ 17,0 |
| | 0,3-0,4 МПа, | 6,9 ÷ 19,1 |
| Содержание частиц размером 0,05-2,00 мм, % | 0 ÷ 84,2 | |
| Содержание частиц размером >2 мм, % | 0 ÷ 33 | |

фракции 300 мм - не более 10%), с пределом прочности на одноосное сжатие $R_c > 20$ МПа и с коэффициентом размягчаемости $K_{saf} > 0,75$, плотностью грунта 2,15 - 2,3 г/см³; модулем деформации $E=40$ МПа. Мощность искусственного основания на исследуемом участке составила от 1 до 3 м (табл. 3) для уже построенных и строящихся домов.

Качество уплотнения грунтов искусственного основания определяется методом измерения динамического модуля упругости прибором ZFG 3000. Полученные результаты позволили определить степень уплотнения, а также коэффициент уплотняемости (табл. 3).

Для наблюдения за вертикальными смещениями (осадками) конструкций каждого здания, на уровне перекрытия 2-го этажа выполнено закрепление четырех геодезических марок и далее при монтаже каждого третьего этажа производились замеры. Данные результатов мониторинга за осадками приведены в табл. 3. По результатам геодезического мониторинга, проведенного в период строительства дома № 1 (июль 2021 - февраль 2022 гг.) и до момента ввода в эксплуатацию (июль

Значения степени уплотнения техногенных грунтов искусственного основания и результаты геодезического мониторинга за осадками зданий

| Жилой комплекс «КОСМОС» | Степень уплотнения грунта | Коэффициент уплотняемости | Динамический модуль упругости, МПа | Значения осадок в период монтажа 2-25 эт., см (даты) | Значения осадок за весь период мониторинга, см (даты) | Мощность искусственного основания, м |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|--|---|--------------------------------------|
| Дом №1 25 этажей | 2,91-3,19 | 0,97 | 49,75-50,49 | $\frac{1,2 - 1,8}{(23.07.21 - 16.02.22)}$ | $\frac{1,9 - 2,8}{(23.07.21 - 04.07.23)}$ | 1,6 |
| Дом №3 25 этажей | 2,65-3,00 | 0,97 | 58,64-64,80 | $\frac{1,1 - 1,5}{(16.02.22 - 14.07.22)}$ | $\frac{2,1 - 2,5}{(16.02.22 - 25.09.23)}$ | 2,0 |
| Дом №4 19 этажей | 3,27-3,50 | 0,97-0,98 | 41,58-67,36 | Начало мониторинга (01.11.24) | | 1,0 |
| Дом №5 25 этажей | 2,46-2,93 | 0,97-0,98 | 65,56-97,10 | $\frac{0,9 - 1,1}{(13.04.23 - 11.09.23)}$ | $\frac{1,3 - 1,5}{(13.04.23 - 05.11.24)}$ | 2,0 |
| Дом №6 25 этажей | 3,19-3,44 | 0,97-0,98 | 40,56-50,49 | $\frac{0,8 - 0,4}{(28.11.23 - 22.04.24)}$ | $\frac{0,9 - 1,6}{(28.11.23 - 08.09.24)}$ | 3,0 |

2023 г.), установлено, что величина общей осадки максимальная по сравнению с осадками других домов, однако величина ее незначительна и составляет 1,9-2,8 см, что ниже выполненных при проектировании расчетах по осадке фундаментной плиты, которые составили 10,5 см. Необходимо отметить, что кровля элювиальных грунтов под данным зданием залегает на глубине от 2,5 до 4 м, а кровля скальных пород неровная - на глубинах от 5,5 до более 25 м (см. рис. 1). Наибольшие осадки наблюдались на участке «кармана» дисперсной зоны коры выветривания (марка М4) (рис. 2).

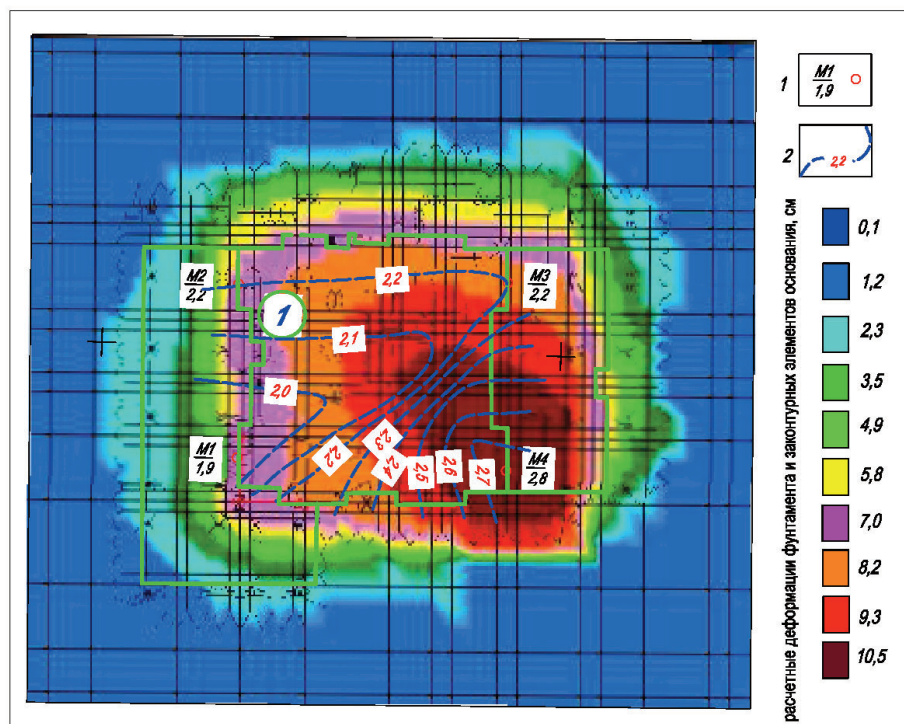


Рис. 2. Осадки дома № 1 по результатам расчета (цветовая палитра) и мониторинга: 1 – осадочная марка (в числителе – номер марки, в знаменателе – величина осадки, см), 2 – изолинии осадки, см (по результатам геодезического мониторинга)

Таким образом, искусственное основание на элювиальных грунтах является надежным вариантом устройства фундаментов в условиях распространения данных специфических грунтов, для которых характерна неоднородность физико-механических свойств и сложная структура строения. Наличие элювиальных грунтов в строении разреза проектируемого строительства может привести к развитию обрушений в стенках котлована, а также к увеличению величины вертикальных и горизонтальных осадок земной поверхности. Мониторинг при строительстве – это отклик реальной среды размещения объекта на строительные воздействия, контролируемый инструментальными измерениями, для принятия своевременных решений по устранению развития негативных процессов.

Литература

1. Дубейковский С.Г., Бодин В.В., Овечкина О.Н., Юртаев А.И. Особенности инженерно-геологического строения элювиальных грунтов Урала // *Инженерная геология*. 2010. № 2. С. 36–40.
2. Овечкина О.Н. Оценка и прогноз изменения состояния геологической среды при техногенном воздействии зданий высотной конструкции в пределах города Екатеринбурга: дис. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.08 / Екатеринбург, 2013. 159 с.
3. Подкорытова Л. И. Инженерно-геологическая характеристика элювия района г. Свердловска: автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук. М.: МГУ, 1984. 17 с.
4. Ярг Л.А. Методы инженерно-геологических исследований процесса и кор выветривания. М. Недрa, 1991, 138 с.

АКТУАЛЬНЫЙ ВЗГЛЯД НА ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ИНЖЕНЕРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ПРОШЛЫХ ЛЕТ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАССИВОВ ГРУНТОВ НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА В Г. МОСКВЕ

Н.Н. Ракитина¹, Р.Ю. Жидков¹, Ф.К. Буфеев^{2,3}

¹ ГБУ «Мосгоргеотрест», 123040, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 11, с.1

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2

³ МГРИ им. С. Орджоникидзе, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23

E-mail: nfrakitina@mngt.ru; e-mail: rzhidkov@mngt.ru; e-mail: fbufeev@mail.ru

Инженерно-геологические данные, полученные в результате изысканий, представляют собой фактические сведения о грунтах, подземных водах, геологических процессах и явлениях, полученные в ходе полевых и лабораторных работ. К инженерно-геологическим данным можно отнести, например, зафиксированные в процессе бурения глубины границ геологических слоев, уровни появления и установления водоносных горизонтов, показания, снятые с лабораторных и полевых приборов. Будучи совместно обработаны, обобщены и проинтерпретированы применительно к решению конкретной прикладной задачи, данные порождают *инженерно-геологическую информацию* – результаты полевых и лабораторных исследований, агрегированные показатели свойств грунтов по территории, прогнозы изменения инженерно-геологических условий, карты, схемы, разрезы, которая позволяет принять конструктивные решения, сделать выводы и прогнозы. В архиве ГБУ «Мосгоргеотрест» содержатся инженерно-геологические данные и информация, полученные начиная с 1944 г. Это огромный объем сведений, который используется, в том числе для построения трёхмерной геологической модели г. Москвы.

Трёхмерная геологическая модель Москвы строится на основании анализа сведений о рельефе, в т.ч. восстановленном по архивным топографическим планам, о геоморфологическом строении, пространственном положении геологических тел, уровней подземных вод, распространении инженерно-геологических процессов и свойствах грунтов.

Все данные и информация, включаемые в трехмерную геологическую модель, сведены в СУБД PostgreSQL. При совместной обработке сведения проходят процедуру верификации и валидации. Однако, в соответствии с п. 6.1.7 СП 47.13330.2016 [1] на застроенных территориях не допускается использование результатов инженерно-геологических изысканий старше двух лет, и такие результаты не могут быть использованы для проектирования без дополнительных изысканий. Стоит отметить, что в кругах специалистов, выполняющих изыскания и проектировщиков, и даже некоторых экспертов в обиходе распространён термин «актуализация изысканий». При этом никто точно не знает, что это такое, а потому каждый специалист руководствуется собственными суждениями при уменьшении объёмов работ в рамках производства повторных изысканий на площадке.

Научных публикаций, в которых бы обосновывалась эта норма (2 и 5 лет) найти не удалось, но можно предположить, что в её основе лежат соображения об изменчивости некоторых компонентов инженерно-геологических условий (ИГУ) во времени. Измениться могут тектонические условия (в редких случаях), состав и режим подземных вод, интенсивность инженерно-геологических процессов и свойства грунтов. При этом необходимо отметить, что в научно-технической литературе неоднократно приводились результаты, свидетельствующие, что в отдельных случаях осадки основания могут продолжаться десятилетиями [2, 3, 4]. Исходя из вышеизложенного, при принятии решения о возможности использования инженерно-геологической информации, возраст которой превышает указанные в нормативных документах рамки, было бы правильно ответить на следующие вопросы:

- возможно ли оценить характер и интенсивность изменения природных и техногенных условий?
- какова процедура верификации данных при совместном использовании со вновь полученными результатами?

• можно ли спрогнозировать дальнейшее изменение компонентов ИГУ, исходя из ретроспективного анализа?

Для того, чтобы приступить к решению этих вопросов, было проведено исследование, в рамках которого на примере ограниченного участка изучалось, влияет ли давность испытания на значения показателей физических и физико-механических свойств.

Для исследования была выбрана территория в Хорошевском районе Москвы, между р. Москвой и Третьим транспортным кольцом. Её выбор обусловлен высокой степенью инженерно-геологической изученности – в архиве хранятся данные об изысканиях, проведённых с начала 40-х гг. прошлого века по настоящее время. В пределах района расположены промышленные объекты, жилые дома, железные дороги (Смоленское направление, МЦД-4, МЦК) и крупные автомагистрали (Третье транспортное кольцо, просп. Багратиона, Шелепихинское ш., Звенигородское ш.).

Общее количество пробуренных скважин на участке изысканий составляет 1893 шт., при средней глубине выработок 24 м. Площадь участка 1,8 км². Такой плотности данных достаточно для обеспечения инженерно-геологической съёмки в масштабе 1:1000 для сложных ИГУ (территория располагается в границах несколько геоморфологических элементов, потенциально опасна в карстово-суффозионном отношении, частично подтоплена). Геологическое строение территории показано на геологическом разрезе (рис. 1).

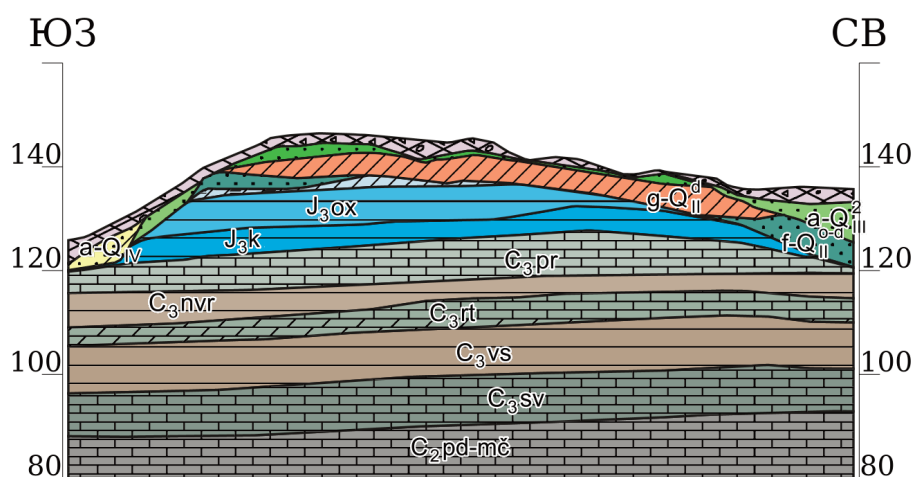


Рис. 1. Геологический разрез, построенный с применением трехмерной геологической модели г. Москвы (соотношение вертикального и горизонтального масштабов 1:5)

Для исследования были выбраны отложения оксфордского и келловейского ярусов верхнего отдела юрской системы, представленные глинами тугопластичной, полутвердой и твердой консистенции. Так как эти грунты широко распространены в московском регионе и часто попадают в зону хозяйственного освоения, их свойства хорошо изучены. Так, к примеру, корреляционные зависимости прочностных и деформационных характеристик от физических свойств, выведенные по результатам статистического обобщения архивных данных приведены в СТО 36554501-020-2010 [5].

Для нашего исследования выборка проб включала 404 определений показателей комплекса физических свойств и 166 определений физико-механических характеристик, выполненных в период с 2001 по 2021 г. в разных лабораториях. Грунты различной консистенции были объединены в одну выборку намеренно, чтобы охарактеризовать общую изменчивость характеристик в грунтовом массиве.

Для начала была произведена совместная статистическая обработка показателей свойств, результаты которой приведены в таблице 1. Предварительно была произведена отбраковка статических «выбросов».

По результатам статистической обработки можно сделать вывод о том, что массив достаточно однородный – при значительном диапазоне разброса значений показателей свойств, коэффициенты вариации составляют 0,02-0,34.

Далее был проведен корреляционный анализ показателей следующих пар свойств: пластичность – коэффициент пористости, сцепление – угол внутреннего трения, сцепление – абсолютная

| Результаты статистической обработки | | | | | | | | Таблица 1 |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|-----------|-----------------------|-----------|
| Показатель | Плот. г/см ³ | Плот. част. г/см ³ | Влаж. прир. д.е. | Число пласт. д.е. | Коеф. пор. д.е. | Сцеп. МПа | Угол внутр. тр. град. | |
| Число опред. | 404 | 404 | 404 | 403 | 404 | 131 | 153 | |
| Мин. значение | 1,51 | 2,50 | 0,29 | 0,17 | 0,85 | 0,024 | 10 | |
| Макс. знач. | 1,92 | 2,85 | 0,67 | 0,64 | 1,76 | 0,089 | 27 | |
| Сред. знач. | 1,73 | 2,71 | 0,43 | 0,44 | 1,26 | 0,053 | 18 | |
| Коеф. вар. | 0,04 | 0,02 | 0,13 | 0,20 | 0,13 | 0,34 | 0,19 | |
| Станд. откл. | 0,07 | 0,05 | 0,06 | 0,09 | 0,16 | 0,02 | 3,58 | |

отметка, угол внутреннего трения – абсолютная отметка. Графики корреляции представлены на рис. 2. Цветом показан год проведения испытаний.

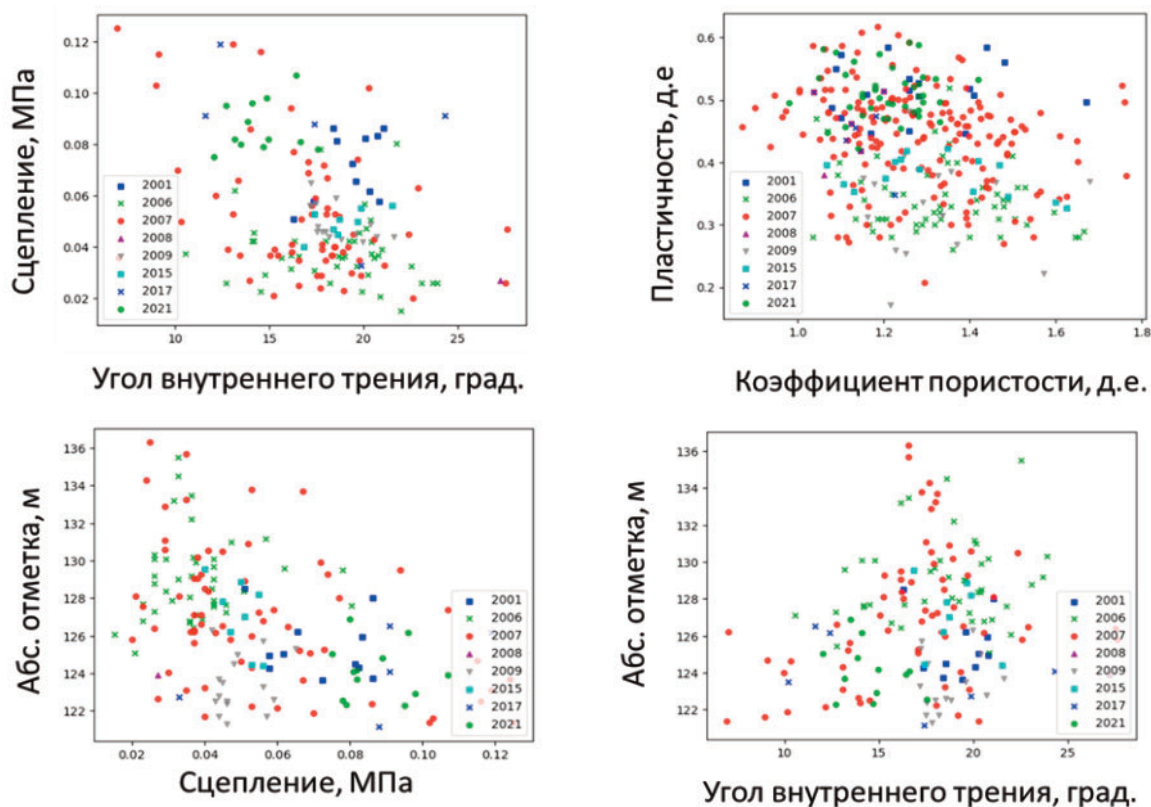


Рис. 2. Графики зависимости для различных пар показателей

По графикам видно, что облако точек ложится кучно и нет выраженной закономерности изменения значений показателей свойств в зависимости от года проведения инженерно-геологических изысканий.

Результаты корреляции представлены в таблице 2.

Как видно из таблицы, связь показателей свойств грунтов с годом проведения изысканий *очень слабая* (*слабая* только для сцепления). *Средняя* связь обнаружена только для между сцеплением и расстоянием до железной дороги. Изучению этого явления будет посвящено отдельное исследование.

Таблица 2

Результаты корреляционного анализа*

| Показатель | Глуб. отб. | Число пласт. | Пок. тек. | Коэф. пор. | Год пров. изыск. | Сцепл. | Угол внут. тр. | Расст. от жел. дор. | Абс. отм. обр. |
|---------------------|------------|--------------|-----------|------------|------------------|--------|----------------|---------------------|----------------|
| Глуб. отбора | - | 0,13 | -0,25 | -0,42 | 0,2 | 0,25 | -0,1 | -0,06 | -0,21 |
| Число пласт. | 0,13 | - | -0,02 | -0,25 | 0,23 | 0,41 | -0,13 | 0,37 | -0,21 |
| Пок. тек. | -0,25 | -0,02 | - | 0,33 | -0,11 | -0,09 | -0,05 | 0,03 | 0,19 |
| Коэф. пор. | -0,42 | -0,25 | 0,33 | - | -0,16 | -0,23 | 0,07 | -0,17 | 0,34 |
| Год пров. изыск. | 0,2 | 0,23 | -0,11 | -0,16 | - | 0,33 | -0,18 | -0,26 | 0,23 |
| Сцепл. | 0,25 | 0,41 | -0,09 | -0,23 | 0,33 | - | -0,46 | 0,57 | -0,43 |
| Угол внут. тр. | -0,1 | -0,13 | -0,05 | 0,07 | -0,18 | -0,46 | - | -0,22 | 0,21 |
| Расст. от жел. дор. | -0,06 | 0,37 | 0,03 | -0,17 | -0,26 | 0,57 | -0,22 | - | -0,15 |
| Абс. отм. образца | -0,21 | -0,21 | 0,19 | 0,34 | 0,23 | -0,43 | 0,21 | -0,15 | - |

*по шкале Чеддока силу зависимости следует интерпретировать следующим образом: 0-0,3 – очень слабая, 0,3-0,5 – слабая, 0,5-0,7 средняя. Положительные величины – прямая корреляция, отрицательные – обратная [6]

Выводы

1. Нет чёткого научного обоснования срока актуальности результатов показателей физико-механических свойств грунтов 5 лет (для незастроенных территорий) и 2 (для застроенных территорий).

2. Как показали исследования, время отбора образцов в некоторых случаях (в том числе, в сложных инженерно-геологических условиях), никак не отражается в хоть сколько-нибудь заметных закономерных изменениях значений показателей их свойств.

3. В некоторых случаях возможно использование результатов лабораторных исследований старше 2 (или 5) лет. Вероятно, есть условия (изменение напряженно-деформированного состояния массива грунтов), при которых свойства грунтов меняются до истечения 2-х лет.

4. Необходим более гибкий подход к использованию данных архивных инженерно-геологических изысканий при сохранении их точности и достоверности.

5. Необходима разработка методологии обработки данных архивных инженерно-геологических изысканий, включая критерии возможности использования архивной инженерно-геологической информации совместно с вновь полученной.

Литература

- СП 47.13330.2016 (актуализированная редакция СНиП 11-02-96) «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения».
- Тер-Мартыросян З.Г., Акулецкий А.С. Взаимодействие сваи большой длины с многослойным массивом грунта с учетом упругих и реологических свойств и упрочнения // Вестник МГСУ. 2021. №5.
- Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Основные закономерности взаимодействия основания и надземных конструкций // здания. – Развитие городов и геотехническое строительство. - СПб: 2006, №10. С.63-92.
- Далматов. Б.И., Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии): учебник / Б. И. Далматов. — Санкт-Петербург: Лань, 201.
- СТО 36554501 -020-2010 «Деформационные и прочностные характеристики юрских глинистых грунтов Москвы».
- Chaddock RE. Principles and methods of statistics. – Boston, New York, [etc.]. 1925. 471 p

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАРСТОВОГО МАССИВА С ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГОЙ НА УФИМСКОМ КАРСТОВОМ КОСОГОРЕ В 1888–2024 ГГ.

А.И. Смирнов

Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, 450077 г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2
E-mail: smalil@mail.ru

Введение

Объектом исследований является участок железной дороги (далее ж.-д.) в г. Уфе на Уфимском карстовом косогоре, который интенсивно подвержен воздействию провалообразования сульфатного карста. Косогор площадью около 7 км² представляет собой высокий (до 80 м) и крутой, в нижней части обрывистый, расчленённый эрозионными и эрозионно-карстовыми оврагами правый склон долины р. Белой, вдоль которого проходит ж.-д. Самара-Челябинск, а полотно её на межовражьях проложено непосредственно по гипсам кунгурского яруса ранней перми.

История исследований карста на косогоре насчитывает более, чем вековой период (с конца XIX в.). Изучение его обусловлено строительством и эксплуатацией (с 1888 г.) Самаро-Златоустовской (ныне Куйбышевской) ж.-д. на отрезке с 453 до 459 версты (сегодня 1622-1629 км — от ж.-д. вокзала до створа ул. Чудинова в г. Уфе). Сведения о карсте косогора содержатся в многочисленных публикациях и производственных отчетах, которые сведены в [3]. Здесь лишь следует подчеркнуть, что наиболее ценные сведения о карсте косогора содержатся в работах Д.Л. Иванова, Г.Г. Скворцова, С.П. Ткалича, В.И. Мартина и В.Ф. Ткачёва.

Методы исследований

Исследования выполнены по стандартной методике ведения карстомониторинга, который организован на косогоре в 1976 г. геологической службой «Башкиргеология» (Ткачёв В.Ф., Смирнов А.И., Неклеёнова Т.И. и др.) и непрерывно ведется различными организациями уже почти 50 лет.

Карстомониторинг включает в себя регулярные наблюдения за динамикой формирования существующих и выявлению новых карстопроявлений [6, 8, 11], которые проводятся два раза в год (после снеготаяния и перед установлением мерзлого слоя) и включают в себя также наблюдения за гидрохимией и гидрометрией поверхностного и родникового стока.

Исходные данные

Результаты исследований базируются на данных изучения карста и ведения карстомониторинга на косогоре за весь период его осуществления.

Первые обобщения по воронкам и провалам косогора были сделаны ещё в 1894-1896 гг. в ходе первых исследований карста Д.Л. Ивановым [5], а в 1941-1945 гг. Г.Г. Скворцовым в процессе инженерно-геологических изысканий экспедицией «Транспроекткарьера» [7]. Позже наблюдения за активностью развития существующих и образованием новых карстопроявлений в 1946-1974 гг. проводились Уфимской гидрогеологической станцией при изучении режима подземных вод (С.П. Ткалич, В.И. Мартин, В.Ф. Ткачёв и др.).

Как уже указывалось выше, в 1976 г. на косогоре организован карстомониторинг, который в 1976-2015 гг. осуществлялся подразделениями «Башкиргеология» и «Башгеолцентр» [11]. С 2016 г. он ведется отделением мониторинга по Республике Башкортостан филиала «Приволжский региональный центр ГМСН» ФГБУ «Гидроспецгеология» (О.В. Садыкова), результаты которого отражены в ежегодных государственных докладах Министерства природопользования и экологии Республики Башкортостан [1].

Таким образом, на косогоре получен почти 50-летний непрерывный ряд наблюдений за активностью проявления карста на его поверхности. Сводные данные по активности развития карста до 2015 г. отражены в [6, 8, 9, 11 и др.], которые дополняются настоящими сводными данными по провалобразованию вдоль полотна ж.-д. за последнее десятилетие и приводятся впервые.

Результаты исследований

Природные условия Уфимского косогора изучены относительно хорошо. То же самое можно сказать и об изученности карста косогора. Его положение на карте карста «Уфимского полуострова» приведено ниже на рисунке.

В настоящее время для карста Уфимского косогора определены типы, условия и факторы его развития, установлены основные закономерности распространения поверхностных карстопоявлений. В целом карст косогора можно охарактеризовать следующим образом [по 2, 4-9, 13 и др.]:

– подавляющая часть карстопоявлений на косогоре обусловлена развитием сульфатного карста в гипсах кунгурского яруса ранней перми;

– интенсивность распространения поверхностных проявлений карста обратно пропорциональна мощности покрывающих гипсы уфимских терригенно-карбонатных отложений и уклону местности;

– к факторам, ускоряющим развитие карста на косогоре с обстановкой активного водообмена карстовых вод [10], относятся невидимый переток в гипсы агрессивных к ним вод из вышележащих пород уфимского яруса, а также поглощение в понорах родникового и поверхностного стока, обладающего высоким дефицитом насыщения сульфатом кальция;

– главной особенностью карста на косогоре является то, что, развиваясь на западной окраине Уфимского полуострова, интенсивность распространения и активность проявления его на поверхности значительно больше, чем на восточной, что обусловлено более древним и расчленённым правым склоном долины р. Белой, чем правым склоном долины р. Уфы (см. рис.);

– современная активность карста на косогоре, имеет унаследованный характер его развития от неоген-четвертичного времени, что выражается в образовании новых карстовых провалов на участках с повышенной пораженностью карстопоявлений [7, 12] — новые карстовые провалы образуются рядом с существующими или на месте ранее ликвидированными.

Активность провалообразования. Наибольшая частота возникновения провалов вдоль железнодорожного полотна зафиксирована на его отрезках:

– пересекающих устьевые части оврагов: 1622 км ПК 9 - 1623 км ПК 2; 1623 км ПК 9 - 1624 км ПК 1; 1624 км ПК 2-6; 1625 км ПК 1-2; 1625 км ПК 5+50 - 6+50; 1626 км ПК 6 - 1627 км ПК 1+50; 1627 км ПК 6-8;

– пересекающих межовражья: 1626 км ПК 4-6; 1625 км ПК 8+50 - 9+50; 1626 км ПК 2-4; 1627 км ПК 2+50 - 4; 1627 км ПК 8 - 1628 км ПК 2; 1628 км ПК 3 - 6+50.

На первых указанных отрезках ж.-д. образованию провалов способствует поглощение поверхностного стока в днищах оврагов в понорах, через которые поверхностный сток невидимым потоком под железнодорожным полотном отводится непосредственно в четвертичный аллювий долины р. Белой.

На вторых отрезках ж.-д. образованию провалов способствует развитие трещин бортового отпора, наиболее интенсивно развитых в местах сочленения склонов оврагов с правым склоном долины р. Белой.

За весь период эксплуатации ж.-д. на Уфимском косогоре (с 1888 г. по 2024 г.) вдоль её полотна образовалось не менее 120 новых карстовых провалов (в среднем по 0,88 шт. в год). При этом, установлено, что почти все они образовались в тёплый период года. Как и в целом по косогору, наиболее часто они возникали в годы с повышенной водообильностью [8, 9, 11].

По данным Г.Г. Скворцова с 1926 по 1945 г. возникло 25 провалов (1,32 шт. в год). В 11-ти случаях они вызвали перерыв движения поездов продолжительностью от 20-30 минут до двух суток. [7]. Самый крупный провал на косогоре образовался 27 апреля 1927 г. на 1623 км, глубиной 13-14 м, захвативший склон насыпи дороги и нечётный путь площадью 1500 м². Карстовые провалы возникали и непосредственно на путях дороги. Так, летом 1991 г. под шпалами чётного пути (1623 км ПК 5) образовалось сразу два провала в 10 м друг от друга диаметром 1,5 м и глубиной 0,7 м. Провалы были оперативно ликвидированы, а скорость движения поездов по косогору была снижена до 15 км в час [8]. Между тем, наиболее часто новые провалы вдоль железнодорожного полотна возникали в кюветах, причем нередко повторно. Например, 24.04.2000 в 4 м справа от линии чётного пути на 1626 км ПК3+12 возникла воронка диаметром 1,5 м, глубиной 1,0 м, которая образовывалась на месте ранее ликвидированных воронок 25.11.1977 и 17.04.1995 [11].

В рассматриваемый период частота возникновения провалов от года к году постепенно уменьшалась. В первые десятилетия эксплуатации ж.-д. образование провалов вдоль её полотна наблюдалось почти ежегодно (особенно в первые 25 лет), а в последние 50 лет образовалось не более 20 провалов

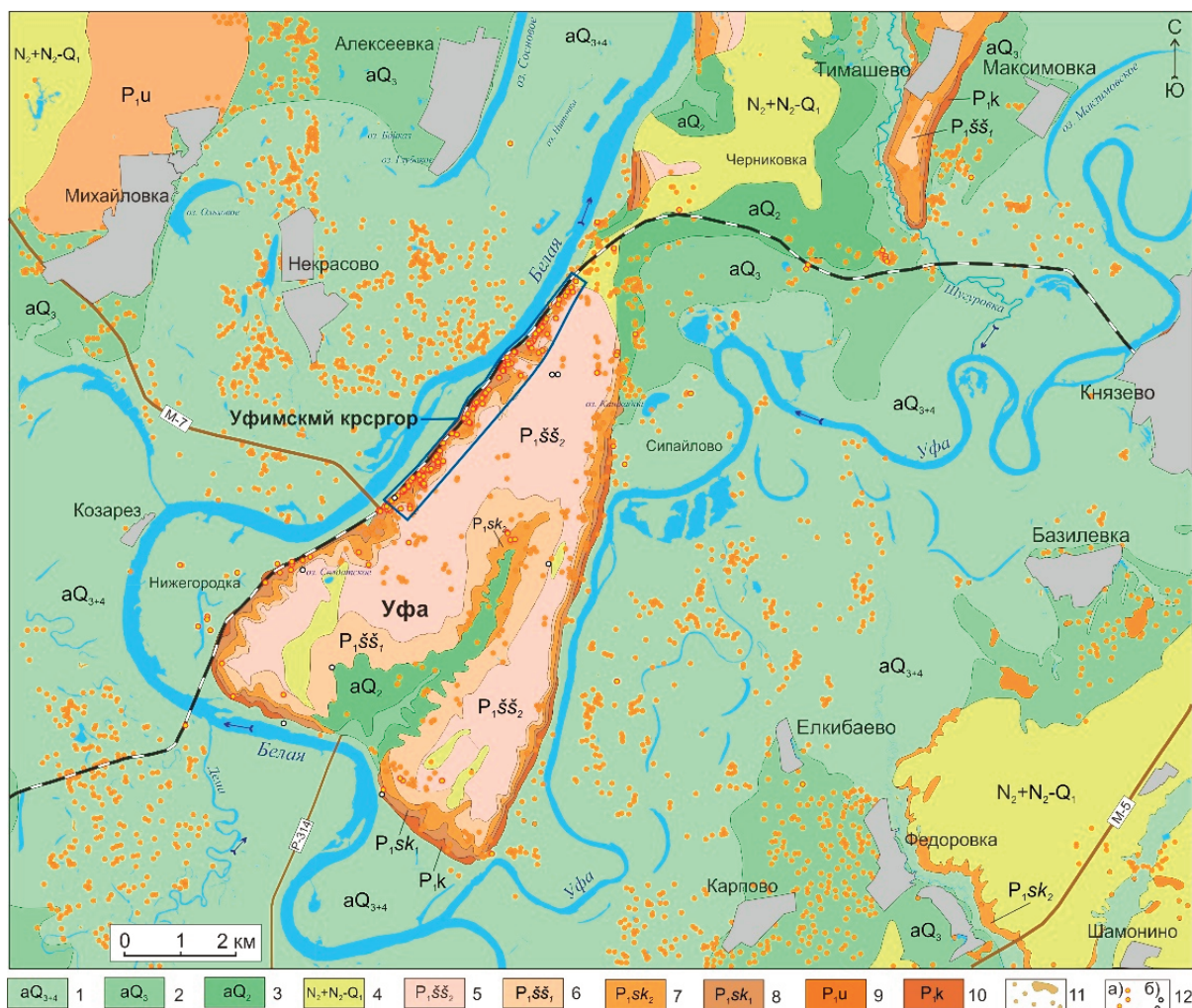


Рис. Уфимский косогор на карте карста «Уфимского полуострова»

Составил А.И. Смирнов [по 2]

Типы сульфатного карста по степени обнаженности карстующихся пород. Перекрытый (подаллювиальный или камский) карст в днищах долин рек в пределах: 1 — поймы и первой надпойменной террасы (голоцен и верхний плейстоцен, Q_{3-4}), 2 — второй надпойменной террасы (верхний и средний плейстоцен, Q_{2-3}), 3 — третьей надпойменной террасы (средний плейстоцен, Q_2). 4 — покрытый карст на пологих склонах и низких междуречьях под плиоценовыми (N_2) и плиоцен-нижнеплейстоценовыми (общесыртовая свита, N_2-Q_1) преимущественно суглинисто-глинистыми отложениями. Закрытый (русский) карст на склонах речных долин и водораздельных пространствах, в границах уфимского яруса: 5 — песчано-глинистая толща (шешминский горизонт, $P_{1\text{ss}2}$), 6 — известковая толща (шешминский горизонт, $P_{1\text{ss}1}$), 7 — терригенно-доломитовая толща (соликамский горизонт, $P_{1\text{sk}2}$), 8 — глинисто-мергельная толща (соликамский горизонт $P_{1\text{sk}1}$); 9 — уфимский ярус нерасчлененный. 10 — открытый (голый или срединноморский) карст на участках выхода гипсов кунгурского яруса на дневную поверхность в пределах склонов долин рек, в днищах оврагов и их склонов. 11 — карстовые поля и отдельные воронки; 12 — провалы с фиксированным временем образования (1976–2024 гг.): а) — карстовые, б) — техногенные.

(0,4 шт. в год). При этом часть из них образовалась повторно — на месте ранее ликвидированных воронок и провалов, а размеры их заметно снизились. Если в первые 50 лет эксплуатации ж.-д. поперечник провалов часто составлял 3-5 м, а глубина достигала 4 м, то в последние — диаметр и глубина их не превышали 2,0 и 1,0 м соответственно. Более того, в первой четверти XXI в. образование значительных карстовых провалов, которые никогда не остаются незамеченными, вдоль полотна ж.-д. практически не фиксировались. В последние 20 лет вдоль ж.-д. возникло (причем только в кюветах) не более пяти мелких (поперечником и глубиной менее 1,0 м) карстово-гравитационных провалов.

Таким образом, за весь период эксплуатации ж.-д. активность провалообразования вдоль её полотна постепенно уменьшалась. Причина этого явления относительно проста и обусловлена следующими факторами.

Первоначально строительство и эксплуатация ж.-д. на косогоре ускорило активность образования провалов, обусловленных обрушением сводов карстовых полостей, которые начали формироваться

на косогоре ещё в раннем плейстоцене (около 5 млн. лет назад) [2, 7, 11, 13]. Этому способствовали дополнительные динамические нагрузки на полотно дороги и вибрация, от проходящих по ней железнодорожных составов.

После образования карстово-гравитационных провалов, которые ликвидировались глинистым грунтом, большинство из скрытых полостей заполнились насыпным материалом и уже не проявлялись на поверхности столь часто, хотя вибрационно-динамические нагрузки на полотно дороги усилились из-за увеличения веса железнодорожных составов. Кроме того, возникающие просадки полотна ж.-д. нивелировались регулярной подсыпкой балласта из гравия. То есть, расширяющиеся существующие и вновь образующиеся карстовые полости заполнялись насыпным грунтом и материалом насыпи ж.-д., чему способствовало постоянное «встряхивание» карстового массива и полотна ж.-д., вызываемое движением поездов.

Таким образом, на первоначальном этапе эксплуатации ж.-д. активность проявления карста в пределах её полотна была максимальной. В последние годы она уменьшилась и образование новых крупных карстовых провалов в пределах полотна ж.-д. маловероятно, хотя полностью и не исключено.

Заключение

Исследованиями установлено, что строительство ж.-д. и её эксплуатация в первые десятилетия на косогоре способствовала активизации провалообразования вдоль её полотна. В последние годы его активность заметно снизилась, что обусловлено влиянием инженерной деятельности человека — ликвидацией провалов, замедляющей дальнейшее развитие существующих подземных полостей, которые начали формироваться в карстовом массиве на косогоре ещё в раннем плейстоцене. Засыпка провалов снижала также и активность развития новых карстовых полостей.

Таким образом, взаимодействие карстового массива с ж.-д. на косогоре в 1888-2024 гг. имеет разнонаправленный во времени характер, обусловленный инженерной деятельностью человека. В первые пять десятилетий динамические нагрузки при движении поездов увеличивали активность провалообразования, вдоль её полотна, а в последние — препятствовали ему. Новые полости не успевают сформироваться до размеров, необходимых для образования крупных карстово-гравитационных провалов, из-за постоянного «встряхивания» карстового массива при движении поездов и регулярной подсыпки балласта на полотно ж.-д. в местах его проседания, которое контролируется инженерно-геологической службой Самарского центра диагностики и мониторинга инфраструктуры ж.-д.

Несмотря на снижение современной активности провалообразования вдоль полотна ж.-д., возникновение новых провалов в его пределах полностью не исключено, особенно на отрезках ж.-д., пересекающих овраги.

Благодарности

Автор выражает благодарность ведущему специалисту отделения мониторинга по Республике Башкортостан О.В. Садыковой за сотрудничество и обмен данными при изучении опасных геологических процессов на Уфимском косогоре и в целом по территории Республики Башкортостан.

Работа выполнена по государственной бюджетной теме FMRS–2025–0013.

Литература

1. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 гг. Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан. Уфа: Изд-во Самрау <https://ecology.bashkortostan.ru/presscenter/lectures/?nav-lectures=page-1>.
2. Епифанова Д.Р., Смирнов А.И. Особенности распространения карстовых провалов на «Уфимском полуострове» в 1972-2022 гг. // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий. 2023. № 11. С. 139–143.
3. Епифанова Д.Р., Смирнов А.И. Обзор исследований карста на «Уфимском полуострове» // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий. 2024. № 15. С. 86–90.
4. Камалов В.Г., Барышников В.И. Опасные геологические процессы на территории Уфимского «полуострова» (Инженерная геодинамика). Уфа: Информреклама, 2019. 216 с.

5. Иванов Д.Л. Уфимские воронки на Самаро-Златоустовской дороге // *Известия Собрания инженеров путей сообщения*. СПб, 1899. 351 с.
6. Мартин В.И., Смирнов А.И., Травкин А.И. Карстомониторинг // *Карст Башкортостана*. Уфа: Информреклама, 2002. С. 341–347.
7. Скворцов Г.Г. Вопросы инженерно-геологического изучения и оценки карста в основании железнодорожных сооружений // *Специальные вопросы карстоведения*. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 43–57.
8. Смирнов А.И. Стационарные наблюдения за карстопроявлениями на Уфимском карстовом косогоре // *Инженерная геология*. 1992. № 2. С. 50–56.
9. Смирнов А.И. Опыт прогноза проявлений сульфатного карста на примере Уфимского косогора // *Разведка и охрана недр*. 2011. № 3. С. 64–68.
10. Смирнов А.И. Гидродинамические условия развития карста // *Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий*. 2014. № 10. С. 237–239.
11. Смирнов А.И. Карст и современная его активность на Уфимском карстовом косогоре // *Геологический сборник*. 2015. № 12. С. 223–229.
12. Смирнов А.И., Абдрахманов Р.Ф., Дурнаева В.Н. Пораженность рельефа Южного Предуралья формами сульфатного карста // *Геоморфология*. 2020. № 2. С. 74–84.
13. Ткалич С.П. Карст «Уфимского полуострова» (Башкирия) и намечающиеся закономерности его развития // *Региональное карстоведение*. М.: АН СССР, 1961. С. 70–77.

ТЕХНОГЕННЫЕ ГРУНТЫ Г. ТОМСКА

Л.А. Строкова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия,
г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: sla@tpu.ru

Осуществление хозяйственной деятельности сопровождается формированием и накоплением техногенных отложений, особенно интенсивно этот процесс протекает в городах и промышленных зонах. Под техногенными понимаются грунты, измененные, перемещенные или заново образованные в результате инженерно-хозяйственной деятельности человека [1, 12,13].

Цель данного исследования - сбор, систематизация и анализ имеющихся территориальных геологических данных, результатов инженерных изысканий о техногенных грунтах территории города Томска.

История города Томска началась в 1604 г. с площади 20 соток на Воскресенской горе. В настоящее время площадь города составляет 294,6 км² с населением 545 тыс. человек. На территории г. Томска распространены следующие типы техногенных отложений: 1) природные отложения, техногенно измененные в условиях естественного залегания; 2) природные отложения, перемещенные с мест естественного залегания; 3) техногенные (антропогенные) образования.

Техногенно измененные горные породы это площади, отведенные под жилую и производственную застройку, они занимают 9,9 тыс. га, или 36%, городской территории [9].

Природные отложения, перемещенные с мест естественного залегания – это насыпные и засыпные отложения. К насыпным отложениям относятся насыпи дорог и дамб, засыпные отложения представлены погребенными оврагами, болотами, ручьями. Следует отметить слабую изученность насыпных отложений, за исключением защитной дамбы вдоль р. Томи, обследованной в 2015 г. для ее реконструкции [10]. Обобщенные характеристики физико-механических свойств насыпных грунтов представлены в табл. 1.

Распространение отложений дорожных насыпей увеличивается с развитием транспортной инфраструктуры города. Общая протяженность магистральных улиц и дорог составляет 413 км, а их плотность – 2,3 км/км². Увеличение объема насыпных грунтов будет происходить и в дальнейшем в связи со строительством новых объектов транспортной инфраструктуры: пешеходно-транспортной набережной вдоль р. Томи, путепроводов через железнодорожные линии, магистралей, дублирующих наиболее напряженные участки дорог [2]. Толщина железнодорожной насыпи в отдельных местах города достигает 10 м. Насыпные отложения распространены в районе Лагерного сада, насосной станции, мкр. Черемошники, по берегу р. Томи в виде дамбы [4,7], ниже устья р. Ушайки и в других местах. При строительстве городской насосно-фильтровальной станции на аллювий р. Томи было насыпано до 9-11 м песчано-гравийной смеси.

Отложения засыпанных отрицательных форм рельефа занимают на территории г. Томска значительные площади. Засыпка болот, ручьев, мелких озер началась еще в XVII в. Были погребены пойменные озера, сохранившиеся в настоящее время лишь в топонимах (оз. Сухое площадью 30 га, оз. Источное площадью 10 га) [6]. Засыпные грунты распространены также на склонах надпойменных террас р. Томи, пораженных оврагами: площадки под зданиями комплекса Томского государственного университета, Томского политехнического университета, Томского электромеханического завода, ТУСУРа и др. В районе заводов «Томкабель» и электромеханического засыпаны овраги глубиной до 16-18 м. Насыпной грунт представлен строительным мусором, кусками бетона, а также гравием, песком и глиной. Наибольшее распространение засыпные отложения имеют на склоне третьей надпойменной террасы р. Томи в северной части города (Каштак), здесь засыпались овраги, максимальная мощность – 20 м. В настоящее время активно застраивается долина р. Ушайки в районе ул. Алтайской, расположенной на второй надпойменной террасе этой речки. Застройка ведется на склоне и присклоновом участке долины, где развиты балки, а также микроформы антропогенного рельефа. В геологическом разрезе с поверхности до глубины 20 м здесь развит комплекс современных техногенных отложений – суглинков и насыпного гравийно-галечникового грунта мощностью до 1 м, который подстилается бурыми суглинками и супесями террасового аллювия.

Пойма р. Ушайки и ее притоков засыпается в районе Академгородка, пр. Комсомольского, мкр. «Зеленые Горки», «Южные ворота», где ведется активная застройка. Мощность насыпных грунтов в районе моста через р. Ушайку у Академгородка, по данным полевых исследований, составляет до 10–12 м.

| Физико-механические свойства техногенных отложений дамбы | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------|-------|----------|----------|----------|------------|-----|--------------------------|----------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|
| Описание грун-тов \ Показатели | Размер фракций в мм, содержание в % | | | | | | | W % | ρ г/см ³ | ρ_s г/см ³ | е д.е. | ф град | с кПа | Е МПа | |
| | 200-10 | 10-2 | 2-0,5 | 0,5-0,25 | 0,25-0,1 | 0,1-0,05 | 0,05-0,005 | | | | | | | | <0,005 |
| Суглинок легкий пылеватый туго-пластичной консистенции | | | | 1 | 11 | 22 | 47 | 18 | 18,2 | 1,97 | 2,71 | 0,63 | 19 | 20 | 14 |
| Суглинок легкий песчанистый мягко-пластичной консистенции | | | 3 | 3 | 13 | 23 | 39 | 20 | 21,8 | 1,93 | 2,71 | 0,71 | 17 | 20 | 10,2 |
| Гравийный грунт водонасыщенный с песчаным заполнителем до 40% | | 64 | 9 | 4 | 3 | 21 | | | | 1,90 | 2,65 | | 35 | 2 | 40 |
| Гравийный грунт влажный с песчаным заполнителем до 40% | 39 | 29 | 8 | 8 | 4 | 13 | | | | 1,90 | 2,65 | | 36 | 3 | 43 |
| Щебенистый грунт влажный | 68 | 23 | 4 | 2 | 3 | 1 | | | | | | | 37 | 1 | 45 |

Структура техногенных отложений по занимаемой площади (%)

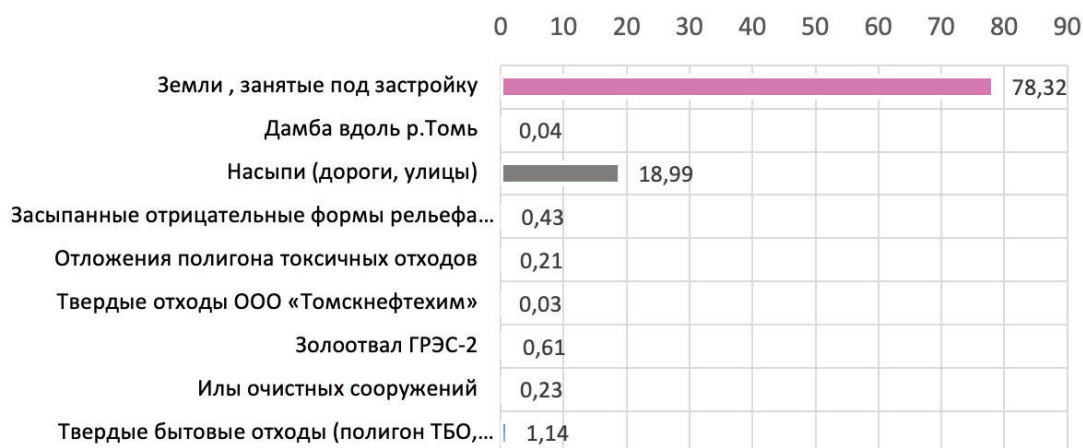


Рис. 1. Структура техногенных отложений города Томска

К техногенным образованиям относятся промышленные и бытовые отходы. Они размещаются на специально организованных полигонах, хранилищах, свалках. Общая площадь объектов размещения отходов на территории г. Томска составляет 288,12 га. В соответствии со статистической отчетностью на территории Томской области за 2023 год образовано твердых коммунальных отходов 284,8 тыс. тонн твердых коммунальных отходов, из них обработано 20,9 тыс. тонн, направлено на утилизацию 1,6 тыс. тонн, захоронено 277,6 тыс. тонн [3]. Объем бытовых отходов, накопленный на свалках, значительно превышает промышленные, однако последние отличаются более высокой токсичностью [8]. Кроме того, большой объем бытовых отходов накапливается на несанкционированных свалках [5].

Полигон опасных промышленных отходов находится в северной части города. За последние 30 лет эксплуатации полигон принял около 73 тыс. тонн опасных отходов, но еще не вышел на проектную мощность. В РФ всего три таких полигона [11]. На территории полигона есть бункер для длительного контролируемого хранения отходов первого класса опасности. Бункер представляет собой монолитный железобетонный корпус глубиной шесть метров с толщиной стен в 60 сантиметров и многослойной наружной и внутренней гидроизоляцией. Он заполнен отходами всего на треть. Отходы в него складываются в специальных контейнерах. Сегодня на полигон из отходов первого класса опасности в основном поступают ртутьсодержащие: люминесцентные лампы и ртутные градусники. Все это в специальных контейнерах складывается в ангар и далее обезвреживается на специальной установке. Выделенная в процессе обезвреживания отходов ртуть отправляется на специализированные объекты переработки. По периметру полигона есть сеть наблюдательных скважин, которые позволяют проводить постоянный мониторинг подземных вод. Также анализируется состояние почвы, воды, воздуха, растительности.

Старый золоотвал ГРЭС-2 в пойме р. Ушайки, с начала открытия в 1959 г. на площади 18,56 га имеет мощность зольных накоплений от 1,7-6 м по краям и до 18-19 м в центральной части. На золе отвале действует две секции, одна рекультивирована в 2016 г., вторая будет использована для накопления золы до 2052 г. (рис. 2). Новый золоотвал открыт в 1986 г., имеет проектную площадь 58,95 га. Общая масса золошлаковых отходов, размещенных на объектах хранения отходов, по состоянию на 01.01.2022 составляет 1,8 миллионов тонн.

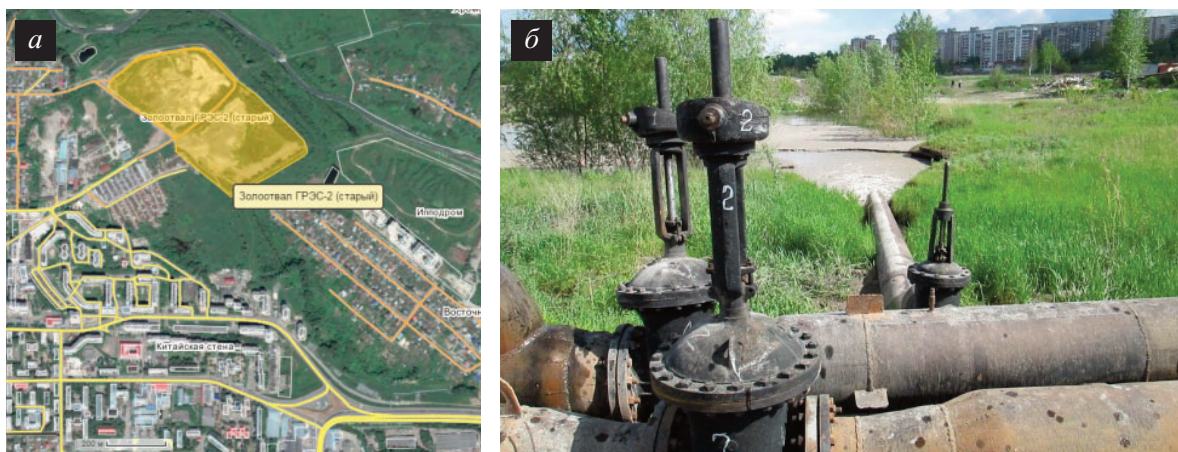


Рис. 2. Местоположение старого золоотвала ГРЭС-2 (а); зона сброса (б)

Полигон ТБО в Новомихайловке работал с 1964-го по 2010 год, за это время там скопилось порядка 10 миллионов тонн мусора, со средней глубиной захоронения около 35 м. По данным администрации, завершить биологическую часть рекультивации планировалось в текущем году, к 2029 году на месте полигона площадью 54 гектара планируется оборудовать зеленую зону отдыха.

Новый полигон ТБО в районе с. Сурово-Сухоречье с выделенной площадью 89,27 га впервые принял отходы в январе 2010 г. В настоящее время размещено 886 тыс. тонн отходов, со средней глубиной захоронения 6 м. Планируемая дата закрытия полигона в 2060 г.

Выводы

В ходе анализа фондовых материалов выявлены разнородные типы и виды техногенных грунтов, характерные для застроенной части города. Наиболее частой особенностью материалов является недоучет состава, строения, состояния и свойств техногенных грунтов в процессе изысканий для проектирования объектов. Опыт же строительства показывает, что аварийные деформации сооружений часто связаны со специфическими характеристиками техногенных грунтов, а именно разнородностью состава и сложения, различной сжимаемостью, длительного самоуплотнения за счет собственного веса; различной мощностью техногенных грунтов; недостаточной изученностью физико-механических свойств таких грунтов.

Полное изучение состава, строения, состояния и свойств техногенных грунтов является важнейшим фактором безаварийной эксплуатации инженерных сооружений.

Данные исследования выступают в качестве научной основы для составления карт распространения техногенных грунтов, что позволит эффективно размещать сооружения, своевременно обнаруживать предпосылки к возникновению деформаций, отслеживать интенсивность, прогнозировать развитие в ближайшей перспективе, чтобы исключить возможность их отказов.

Литература

1. Вознесенский Е. А. Общая генетическая классификация техногенных грунтов // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2019. №. 5. С. 3-9. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-5>
2. Генеральный план г. Томска: Приложение №1 к решению Думы г. Томска от 27.11.2007 № 687. Томск, 2007. 72 с.
3. Доклад «Об экологической ситуации в Томской области в 2023 году»/ под. Ред. Зайцева А.С., Луновой Ю.В. – Томск. Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области ОГБУ «Облкомприрода». 2024. 137 с.
4. Казанцев К. А. Градостроительные и функциональные особенности создания набережной р. Томи в центральной части г. Томска // Избранные доклады 64-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. – 2018. – С. 461-464.
5. Каташова А. Е., Колодная М. И. Анализ учета земель, отведенных под полигоны твердых коммунальных отходов, в Государственном кадастре недвижимости в Томском районе и в городе Томске //Современные вопросы землеустройства, кадастра и мониторинга земель. – 2016. – С. 61-65.
6. Косова Л.С. Рельеф и антропогенные отложения в черте г. Томска // География и природные ресурсы. 1992. № 1. С. 156–160.
7. Манонина Т. Н. Благоустройство Томска: земляная оградительная дамба вдоль реки Томи //Баландинские чтения. – 2015. – Т. 10. – №. 1. – С. 244-247.
8. Мочалова Т. Н., Дорохова А. И., Вычужанова Е. А. Разработка методики расчета параметров пунктов накопления и сортировки твердых коммунальных отходов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – №. 2 (61). – С. 171-181.
9. Осинцева Н. В., Евсеева Н. С. Типы техногенных отложений на территории г. Томска и их геоэкологические аспекты // Вестник Томского государственного университета. 2012. №. 361. С. 176-181.
10. Технический отчет по инженерно-геологическим изысканиям: «Защита территорий г. Томска на правом берегу р. Томи от коммунального моста до устья р. Ушайки от негативного воздействия вод», в рамках государственной программы «Воспроизводство и использование природных ресурсов Томской области в 2013 – 2020 годах» / ОАО Томский проектно-изыскательский институт транспортного строительства «Томгипротранс». – Томск: Томгипротранс, 2015. Ч.1. Т.2. – 100 с.
11. Томский полигон опасных отходов: цианиды, мышьяк и соседи-бобры [Электронный ресурс] / РИА-Томск; 28 сентября 2018; ред. Планкина Е.А, Стефанский П.Б. – Режим доступа: <https://www.riatomsk.ru/article/20180928/poligon-opasnih-promothodov-tomsk/>
12. Трофимов В.Т., Вознесенский Е.А., Королёв В.А. Инженерная геология России. Грунты России. М.: КДУ, 2011. 672 с.
13. Трофимов В.Т., Королёв В.А., Вознесенский Е.А. и др. Грунтоведение // Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во Моск. ун-та; Наука, 2005. 1024 с.

ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАССИВА КАРБОНАТНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ ХОЕКА-БРАУНА

Ю.В. Фролова¹, В.А. Долгов², Е.В. Пиоро³

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1

E-mail: ju_frolova@mail.ru

² ООО «Карбон», 117342, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 176, офис 224 в

E-mail: carbon1996@gmail.com

³ ООО «ПЕТРОМОДЕЛИНГ ЛАБ», 119297, г. Москва, кв-л 32, д. 16 стр. 6

E-mail: ekaterina.pioro@petromodeling.com

Введение

Актуальность изучения скальных грунтов и слагаемых ими массивов в настоящее время неуклонно возрастает. Прежде всего, это связано с активным инженерно-хозяйственным освоением горно-складчатых областей, где эти грунты широко распространены. Кроме того, возрастает техническая сложность инженерных конструкций, все больше ведется проектирование и строительство ответственных и уникальных инженерных сооружений - высотных зданий, подземных объектов различного назначения (горные выработки, тоннели, хранилища углеводородов и радиоактивных отходов и пр.), мостов, гидротехнических сооружений (плотины, тоннели, машинные залы и пр.), основанием или вмещающей средой которых являются скальные грунты. Изучение массивов скальных грунтов проводится в рамках решения фундаментальных, научно-технических и прикладных задач инженерной геологии и геомеханики.

Для того, чтобы оценить поведение скального массива под нагрузкой при взаимодействии с инженерным сооружением, недостаточно знаний о свойствах слагающих его горных пород. Необходимо определить свойства пород в массиве с учетом многих дополнительных факторов, среди которых особенности строения массива, трещиноватость, неоднородность и анизотропия, обводненность, выветрелость, напряженно-деформированное состояние, время, температура и др. Оценка прочностных и деформационных свойств скальных массивов является весьма сложной, неоднозначной и трудоемкой задачей. Применяются три группы методов: (1) полевые крупномасштабные испытания *in situ*, (2) косвенные методы, позволяющие осуществлять переход от свойств образца к свойствам массива на основе сочетания лабораторных и геофизических данных и (3) эмпирические геомеханические классификации, основанные на учете свойств грунта и некоторых параметров массива, в наибольшей степени влияющих на его свойства (трещиноватость, обводненность, НДС и др.).

Эмпирический критерий прочности Хоека-Брауна (Hoek-Brown failure criterion)

В настоящее время для оценки свойств скальных массивов широко используется эмпирический критерий прочности, предложенный Е. Хоеком и Е. Брауном [7]. Он является развитием критерия прочности Кулона-Мора. Усовершенствование заключается в нелинейной форме предельной огибающей, которая в большей степени соответствует реальному деформированию скального грунта, особенно в области высоких напряжений. Предложенная методика оценки прочностных и деформационных свойств скального массива основана на многолетнем анализе большого количества экспериментальных данных, полученных как при лабораторных испытаниях, так и при крупномасштабных полевых опытах. В модель Хоека-Брауна входят две группы параметров: 1) показатели, характеризующие прочностные и деформационные свойства образца скального грунта - прочность на одноосное сжатие образца (σ_{ci}); эмпирический коэффициент, отражающий степень взаимного зацепления минеральных частиц ненарушенного скального грунта и влияющий на степень нелинейности предельной огибающей Хоека-Брауна (m_i); модуль упругости (или модуль деформации) образца (E_y или E_0) и 2) параметры, характеризующие нарушенность скального массива - индекс геологической прочности (GSI) и показатель техногенной нарушенности массива (D) [6].

Обобщенный критерий Хоека-Брауна для трещиноватых массивов имеет вид:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a,$$

где σ_1, σ_3 – главные нормальные напряжения (максимальное и минимальное); m_b, s, a – безразмерные эмпирические коэффициенты, влияющие на форму и степень нелинейности предельной огибающей Хоека. Они зависят от индекса геологической прочности GSI и от коэффициента техногенной нарушенности D:

$$m_b = m_i \exp[(GSI - 100)/(28 - 14D)]$$

$$s = \exp[(GSI - 100)/(9 - 3D)]$$

$$a = 1/2 + 1/6(e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

Объект исследования

Район, для которого проводились исследования и расчеты, расположен в Западном административном округе г. Москвы, в пределах района «Дорогомилово», вдоль набережной Тараса Шевченко р. Москвы. Здесь планируется строительство комплекса многоэтажных жилых зданий.

В строении геологического разреза, вскрытого бурением до глубины 70 м, принимают участие следующие отложения (снизу вверх):

- Известняки московского яруса мячковского горизонта среднего отдела каменноугольной системы.
- Известняки, мергели, аргиллитоподобные глины касимовского яруса верхнего отдела каменноугольной системы;
- Среднечетвертичные аллювиальные отложения II-й надпойменной террасы р. Москва (a2 Шк1);
- Современные техногенные отложения (t Н);

На основании литологического состава и физико-механических свойств грунтов в разрезе выделены 12 инженерно-геологических элементов (ИГЭ).

Расчет свойств массива проведен для карбонатных пород касимовского ($C_{3izm}, C_{3prh}, C_{3nvr}, C_{3rt}, C_{3sv}$) и московского ярусов ($C_2m\check{c}$).

Входящие параметры и их определение

Общий алгоритм использования модели Хоека-Брауна для оценки свойств скального массива представлен на рис. 1.

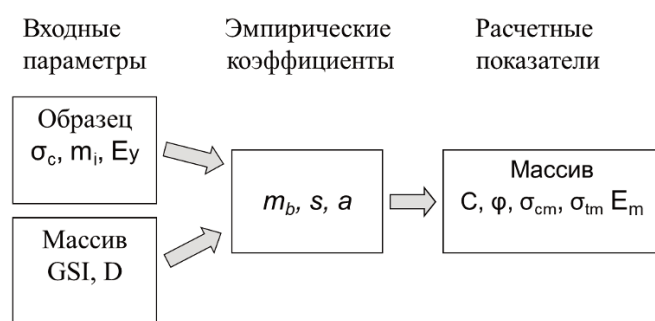


Рис. 1. Общий алгоритм использования модели Хоека-Брауна для оценки свойств скального массива

Значения показателей свойств ненарушенных скальных грунтов (σ_{ci}, E и m_i) для каждого ИГЭ представлены в табл. 1. Испытания проводились для грунтов в водонасыщенном состоянии, что в большей степени соответствует состоянию пород в массиве.

Для расчета параметра m_i использовалась корреляционная зависимость, подробно описываемая в работе [4]:

$$m_i = e^{\left[1.3 \left(\frac{\sigma_{ci} - 2.5\sigma_t}{\sigma_t} \right)^{0.26} \right]},$$

$$r^2 = 0.9884$$

| Литологическое описание и свойства образцов карбонатных пород | | | | | |
|---|-------------------|---|--|--------------------------|--|
| ИГЭ | Индекс | Литологическое описание | Прочность на одноосное сжатие в вод. состоянии | Эмпирический коэффициент | Модуль общей деформации в вод. состоянии |
| | | | $\sigma_{св}$, МПа | m_i , у.ед. | E_0 , МПа |
| 3 | C _{3izm} | Известняк доломитовый малопрочный, размягчаемый. В массиве раздроблен до мелких глыб, щебня и дресвы с известковой мукой, мощность 1,4-1,5м | 7 | 4 | 2398 |
| 5 | C _{3prh} | Известняк доломитовый средней прочности, неразмягчаемый, сильнотрещиноватый, мощность 10,5-12,0 м | 30 | 10 | 3887 |
| 6a | C _{3nvr} | Мергель малопрочный, размягчаемый, мощность 5,1-6,0 м | 5 | 6 | 1543 |
| 7 | C _{3rt} | Известняк мелкозернистый средней прочности, неразмягчаемый, трещиноватый, мощность 4,7-5,1 м | 35 | 7 | 6375 |
| 9 | C _{3sv} | Известняк доломитовый средней прочности, размягчаемый, трещиноватый, с подчиненными прослоями глин аргиллитоподобных, мощность 8,1-9,2 м | 23 | 6 | 4423 |
| 10 | C _{2mč} | Известняк мелкодетритовый, малопрочный, размягчаемый, трещиноватый, вскрытая мощность 17,8-19,8 м | 9 | 5 | 2515 |

где σ_{ci} – прочность на одноосное сжатие образца скального грунта; σ_t – прочность на одноосное растяжение образца скального грунта

Определения прочностных (σ_{ci} , σ_t) и деформационных (E_0) свойств проводились по стандартным методикам [1-3].

Индекс геологической прочности GSI представляет собой эмпирический показатель, позволяющий количественно оценить состояние скального массива в зависимости от его трещиноватости и степени сохранности. По сути, это двухпараметровая рейтинговая эмпирическая классификация, в которую в качестве параметров входят блочность (степень нарушенности массива) и характер поверхности трещин. Существуют различные методики определения величины GSI [8,11]. В данной работе расчет GSI производился по керну скважин через показатель трещиноватости J_{COND89} и показатель качества керна RQD [5, 9]:

$$GSI = 1.5J_{COND89} + \frac{RQD}{2}.$$

Коэффициент техногенной нарушенности массива (D) не зависит от типа, строения и физико-механических свойств исследуемого массива, а является отражением техногенного воздействия на исследуемую породу и условий проходки. Для горизонта C_{3izm} значение D было принято 0,7, для остальных горизонтов D=0.

Расчет показателей физико-механических свойств скальных грунтов в массиве проводился с помощью ПО «RocLab».

Свойства грунтов в массиве

Зная значения параметров GSI и D, рассчитывались эмпирические коэффициенты m_b , s , a , входящие в критерий Хоэка-Брауна, а затем вычислялись показатели прочностных свойств скального массива.

Прочность массива на одноосное сжатие:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a$$

Прочность массива на растяжение:

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b}$$

Угол внутреннего трения:

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

Сцепление:

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \left[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n} \right] (s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \left(6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1} \right) / ((1+a)(2+a))}}$$

Модуль деформации скального массива вычислялся с использованием эмпирической формулы [10]:

$$E_{om} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$

| Таблица 2 | | | | | | | | |
|---|-------------------|----------|------------------|------------------|--------|-------------|--------------|----------------|
| Свойства карбонатных пород в массиве (в водонасыщенном состоянии) | | | | | | | | |
| ИГЭ | Индекс | GSI балл | σ_c , МПа | σ_t , МПа | C, МПа | Φ град | E_o м, МПа | E_o пр*, МПа |
| 3 | C _{3izm} | 10 | 0,003 | 0,001 | 0,04 | 5 | 54 | - |
| 5 | C _{3prh} | 30 | 0,52 | 0,02 | 1,06 | 25 | 316 | 332 |
| 6а | C _{3nvr} | 45 | 0,22 | 0,013 | 0,195 | 25 | 345 | 380 |
| 7 | C _{3rt} | 40 | 1,16 | 0,05 | 1,31 | 25 | 1018 | 448 |
| 9 | C _{3sv} | 45 | 1,03 | 0,06 | 0,90 | 25 | 989 | 722 |
| 10 | C _{2mč} | 55 | 0,72 | 0,06 | 0,40 | 26 | 1027 | 955 |

* E_o пр - модуль деформации по данным прессиометрии

Обсуждение результатов

Проведено сопоставление значений показателей физико-механических свойств карбонатных пород, определенных на образцах и вычисленных для массива. Значения сцепления (C) в массиве снижаются в 5-7 раз, угол внутреннего трения (ϕ) в 2 раза. Исключение составляет измайловский горизонт, сложенный доломитовыми известняками, раздробленными до мелких глыб, щебня и дресвы с карманами известковой муки (разборный массив). Для него характерно значительное снижение сдвиговых характеристик - величины сцепления на два порядка, угла внутреннего трения в 8 раз.

Модуль деформации пород верхнего карбона в массиве уменьшается в 4-6 раз, у известняков среднего карбона в 2 раза. Для перхуровского горизонта, характеризующегося плохой сохранностью керна и высокой трещиноватостью (RQD=21%), значения E_o в массиве снижаются в 12 раз.

Следует отметить, что значения E_{om} , рассчитанные по модели Хоека-Брауна, в целом обнаруживают хорошую сходимость с данными прессиометрии (табл.1). Существенное расхождение зафиксировано лишь для известняков ратмировского горизонта. Возможно, это связано с неоднородностью данного слоя по трещиноватости: в частности, RQD варьирует от 30 до 85%.

Выводы

Расчеты, выполненные с помощью модели Хоека-Брауна для карбонатных пород среднего и верхнего карбона г. Москвы, показали существенное уменьшение значений показателей прочностных и деформационных свойств при переходе от образца к массиву. Наиболее значимое снижение зафиксировано для измайловского и перхуровского горизонтов, что обусловлено их сильной нарушенностью. Значения модуля деформации, рассчитанные по модели Хоека-Брауна, в целом сопоставимы с данными прессиометрии.

Литература

1. ГОСТ 21153.3-85. *Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении*. М.: Изд-во стандартов, 1985. 14 с.
2. ГОСТ 21153.2-84. *Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии*. Введен 01.07.1986. Последнее изменение 2009.
3. ГОСТ 28985-91 *Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии*. Издательство стандартов, 2004.
4. Arshadnejad S. Determination of “mi” in the Hoek-Brown failure criterion of rock. *Mining Science*. 2018. 25. P.111-117.
5. Bieniawski Z.T. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley. 1989.
6. Hoek E. *Practical Rock Engineering – An Ongoing Set of Notes*, 2023. Rocscience website, www.rocscience.com
7. Hoek E., Brown E.T. Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div.*, 1980. ASCE 106 (GT9), P.1013-1035.
8. Hoek E., Brown E.T. *The Hoek-Brown failure criterion and GSI - 2018 edition*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. 11(3). P. 445-463.
9. Hoek E., Carter T.G., Diederichs M.S. *Quantification of the Geological Strength Index Chart // 47th US Rock Mechanics /Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, USA June 23-26, 2013*. P.1-9.
10. Hoek E, Diederichs M.S. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006. 43. P.203–215.
11. Marinos V., Marinos P. and Hoek E. *The geological Strength index: applications and limitations*, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2005. 64 (1). P.55-65. DOI: 10.1007/s10064-004-0270-5

СЕКЦИЯ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ И РАЗВИВАЮЩИХСЯ В НИХ ПРОЦЕССОВ

ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТОВ

М.А. Булатников, А.Ю. Мирный

МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1
E-mail: bulatnikovma@my.msu.ru, MirnyuAY@mail.ru

Введение

Крупнообломочные грунты состоят в основном из окатанных или угловатых обломков горных пород размером более 2 мм, которые составляют более 50% грунта (в процентах от массы воздушно-сухого грунта). В общей классификации грунтов вид крупнообломочных относится к группе несвязных дисперсных грунтов. Главнейшими их особенностями являются:

- наличие в гранулометрическом составе обломков как горных пород, так и первичных минералов, а также их агрегатов, слабо или частично измененных выветриванием;
- преобладание структурных связей механической природы, вследствие чего грунты часто ведут себя как сыпучие тела.

Однако при наличии в крупнообломочных грунтах песчано-пылеватого или глинистого заполнителя они могут терять сыпучесть и приобретать определенную связность, зависящую от количества заполнителя. В этом случае отнесение крупнообломочных грунтов к группе несвязных является условным [1,2].

Крупнообломочные грунты широко распространены в пределах щитов древних платформ, плит древних и молодых платформ, горно-складчатых районах, где они слагают толщи отложений различных генетических типов [1]. Эта разновидность грунтов представлена продуктами механического выветривания - развалами фрагментов коренных пород на поверхностях водоразделов, осыпными и обвальными отложениями на склонах, отложениями временных водотоков, речных русел и поймы, а также дельт, озер, приморских пляжей, грязекаменных потоков.

В практике строительства как в качестве естественных оснований, так и в качестве материала конструкций часто используются крупнообломочные грунты, для расчетного обоснования которых требуются параметры физико-механических свойств.

Научно-обоснованные исследования инженерно-геологических свойств крупнообломочных грунтов тесно связаны с развитием уровня строительной техники и начали проводиться лишь с середины XX века. Эта проблема была поставлена Н.В. Коломенским. В 50-60-е гг. А.И. Шеко были проведены исследования Гурзуфского оползневого массива, параллельно В.Б. Швецом выполнена крупная работа по изучению элювиальных грунтов Урала. Значительный вклад в изученность свойств крупнообломочных грунтов внесли исследования институтов ВОДГЕО, Гидропроект, СоюздорНИИ, ТНИСГЭИ. Наиболее широкие комплексные исследования физико-механических свойств крупнообломочных грунтов с пылевато-глинистым заполнителем были проведены в 70-е годы в Дальневосточном НИИ по строительству под руководством проф. В.И. Федорова.

Данные работы касались, в основном, отработки методик и аппаратуры для испытания грунтов, вопросов классификационной систематизации.

В настоящее время прямые испытания крупнообломочных грунтов не распространены. Прежде всего, это связано с необходимостью использования крупногабаритных установок для соблюдения допустимых соотношений между размерами наиболее крупных обломков и приборов.

Трудность проведения таких опытов и их малое опубликованное количество обуславливает практически полное отсутствие обоснованных методик оценки физико-механических свойств крупнообломочных грунтов и прогноза их изменения в процессе строительства и эксплуатации сооружений [3–5].

В настоящей работе рассматриваются подходы изучения физико-механических свойств крупнообломочных грунтов, выявлены их основные преимущества и недостатки.

Основная часть

Исследованию физико-механических свойств крупнообломочных грунтов посвящены отдельные работы, выполнявшиеся в основном в связи с оценкой устойчивости оползневых склонов и решением конкретных задач гидротехнического и дорожного строительства. В разное время данными вопросами занимались: Н.В. Коломенский, А.И. Шеко, В.Б. Швец, Л.Н. Рассказов, Р.Г. Тулинов, Г.Н. Петров, В.И. Федоров, П.Л. Иванов, Ю.К. Зарецкий, В.Н. Шведов, Р.Г. Кальберген, Р.С. Зинангиров, С.Б. Ухов, З.Г. Тер-Мартirosян и др. [3–12].

Большинство этих исследований можно разделить на две большие группы.

К первой группе относятся исследования, целью которых было установление общих закономерностей между физическими и физико-механическими свойствами крупнообломочных грунтов.

Ко второй группе относятся исследования, целью которых было совершенствование методов прямых испытаний грунтов путем разработки крупногабаритных приборов и принципов моделирования грунтов-аналогов.

Как правило, исследователи физико-механических свойств рассматривают крупнообломочные грунты как совокупность крупнообломочной (частицы более 2 мм) и мелкообломочной (частицы менее 2 мм) составляющих (далее соответствующие аббревиатуры КОГ, КОС и МОС).

Первая группа

Исследования данной группы нацелены на решение задач промышленного и гражданского строительства, в частности дорожного строительства.

По результатам проведенных опытов в ДальНИИС авторы исследований [9,13,14] выделили характерные схемы работы (табл. 1) крупнообломочных грунтов с пылевато-глинистым заполнителем, которая является в настоящее время наиболее признанной инженерами-геологами:

I. Наличие жесткого скелета грунта из КОС. Определяющими факторами являются характеристики КОС. Влияние МОС практически отсутствует.

II. Жесткий скелет сохраняется, но по мере увеличения МОС количество контактов КОС снижается. Возникновение влияния МОС в роли контактного слоя.

III. Жесткий скелет включается в работу постепенно, по мере увеличения нагрузки. Количество контактов КОС снижается. Существенное влияние МОС в роли среды, включающую в себя КОС.

IV. Отсутствие жесткого скелета. Количество контактов КОС незначительное. Увеличение влияния МОС в роли среды, включающую в себя КОС.

V. Структура грунта заполнителя с включениями. Определяющими факторами являются характеристики МОС. Влияние КОС практически отсутствует.

Основными факторами, определяющими свойства крупнообломочных грунтов, по мнению авторов являются:

1. Соотношение в зерновом составе КОС и МОС.
2. Разновидность МОС (супесь, суглинок, глина).
3. Состояние по плотности-влажности МОС.
4. Механическая прочность КОС.
5. Степень окатанности КОС.

На основе проведенных исследований проф. В.И. Федоров в 1973 г. разработал первую редакцию «Рекомендаций по определению прочностных и деформативных характеристик крупнообломочных грунтов с глинистым заполнителем и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями». Затем вышел ряд других работ, касающихся оценки прочностных характеристик обломочно-пылевато-глинистых грунтов [9,13]. В 1989 г. Госстрой в издании Стройиздат выпустил «Методику оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с глинистым заполнителем и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями» [15].

| Схемы работы крупнообломочных грунтов с пылевато-глинистым заполнителем | | | | | Таблица 1 |
|---|-----|---------------------|--------|---|---|
| | | Составляющие КОГ, % | | Схематическое представление | Структурный тип МОС/КОС |
| | | МОС | КОС | | |
| Характерные схемы работы | I | 0-10 | 100-90 |  | контактный/ каркасный |
| | II | 10-20 | 90-80 |  | |
| | | 20-30 | 80-70 | | |
| | III | 30-40 | 70-60 |  | поровый/ с несовершенным каркасом |
| | | 40-50 | 60-50 | | |
| | IV | 50-60 | 50-40 |  | |
| | | 60-70 | 40-30 | | |
| | | 70-80 | 30-20 | | |
| | V | 80-90 | 20-10 |  | |
| | | 90-100 | 10-0 | | |

Основой Методики является физический эквивалент грунта, предложенный В.И. Федоровым и представляющий собой комбинацию оптимального набора аргументов:

$$M_{\tau} = \frac{P_1}{P_2} I_p (1 + I_L)$$

где P_1 - процентное содержание МОС, P_2 - процентное содержание КОС, I_p - число пластичности МОС, I_L - показатель текучести МОС

Исследования были выполнены на модельных грунтах и по их результатам установлено наличие тесных связей физического эквивалента КОГ, прочности и окатанности КОС с их прочностными и деформационными параметрами:

$$M_{\tau}, k_e, k_o \sim \varphi, C, E$$

где k_e - коэффициент истираемости обломков, k_o - коэффициент, учитывающий окатанность КОС.

Оценка физико-механических свойств крупнообломочных грунтов с помощью Методики ДальНИИС характеризуется: высокой скоростью, низкой трудоемкостью, низкой стоимостью.

Однако, в своей монографии [16], посвященной методам определения механических свойств грунтов, Г.Г. Болдырев отмечает, что параметры прочности, рассчитанные с использованием Методики ДальНИИС, отличаются от параметров прочности, полученных по результатам прямых стандартных методов (прямого среза, трехосного сжатия). Это также подтверждается результатами сопоставления параметров, определенных прямым методом и рассчитанных по Методике [3]. Это говорит о том, что

параметры, рассчитанные по физическим свойствам грунта (через определение классификационных показателей грунтов), имеют низкую достоверность. Поэтому данную Методику допустимо применять только для сооружений пониженного и нормального уровня ответственности.

Вторая группа

Исследования данной группы были призваны решать задачи гидротехнического строительства, в первую очередь при возведении грунтовых плотин. Их особенностью является применение крупногабаритных приборов для прямых испытаний крупнообломочных грунтов.

В настоящее время в основном определились принципы, которым должна удовлетворять установка для проведения испытаний на прочность и деформируемость. Однако стандартное оборудование для полевых и лабораторных испытаний крупнообломочных грунтов долгое время отсутствовало. Каждая организация и каждый исследователь конструировал свой прибор, имеющий отличные от других габариты испытываемого образца, траектории нагружения, вид создаваемого напряженного состояния и проч. Методика испытаний также в каждой организации трактовалась по-разному, исходя из поставленных задач, наличия оборудования и других соображений.

Указанные причины приводят к тому, что результаты определения физико-механических свойств крупнообломочных грунтов, полученные в различных организациях и разными исследователями, оказываются несопоставимыми и часто противоречивы. Несмотря на это, в научной литературе предложены отдельные методы, имеющие достаточные обоснования [3–6,17,18].

Очевидно, что решение задач на основании крупномасштабных экспериментов связано с большими затратами средств и времени. В связи с этим, некоторые исследования были направлены на выявление возможности изучения физико-механических свойств крупнообломочных грунтов в стандартных приборах на модельных грунтах-аналогах [9,11]. Согласно этим исследованиям для проведения таких опытов необходимо соблюдать следующий принцип: гранулометрический состав модельного грунта должен быть подобен натурному, но только размеры всех фракций того же петрографического состава необходимо уменьшить в m раз (m – масштаб моделирования), кроме того, каждая уменьшенная частица должна иметь форму, шероховатость поверхности и прочность такими же, как и натурная частица.

Исходя из того, что абсолютный размер частиц не влияет на физико-механические свойства, допустимо уменьшить размер фракций с сохранением пропорций по их содержанию в крупнообломочном грунте.

Однако, это допустимо только для фракций, диаметром более 2 мм. Для фракций менее 2 мм характерно проявление физико-химических процессов, которые будут иметь значительное влияние на физико-механические свойства крупнообломочных грунтов при взаимодействии с водой. Это ограничение обуславливает практически полное отсутствие обоснованных методик оценки физико-механических свойств крупнообломочных грунтов с заполнителем в стандартных приборах на модельных грунтах-аналогах.

Заключение

Определение физико-механических свойств крупнообломочных грунтов в лабораторных условиях осложняется необходимостью использования крупногабаритных установок для соблюдения допустимых соотношений между размерами наиболее крупных обломков и приборов. Возможность изучения крупнообломочных грунтов с заполнителем в стандартных приборах на модельных грунтах-аналогах ограничена. Ввиду отсутствия обоснованных методик, оценка физико-механических свойств крупнообломочных грунтов с заполнителем в стандартных приборах на модельных грунтах-аналогах является актуальной научно-практической задачей.

Литература

1. *Инженерная геология России. Том 1. Грунты России: [монография] / Под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. М.: КДУ, 2011.*
2. *Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. Грунтоведение. Под ред. В.Т.Трофимова. 6-е изд. М.: Изд-во МГУ, 2005.*

3. Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю. *Определение механических характеристик крупнообломочных грунтов прямыми испытаниями в трехосном приборе.* 2016.
4. Зиангиров Р.С., Кальберген Р.Г. *Оценка деформируемости крупнообломочных грунтов // Инженерная геология.* 1987. Vol. 3. P. 107–118.
5. Мирный А.Ю., Идрисов И.Х. *Испытания трехосного сжатия крупнообломочных грунтов // Электронный журнал "Геоинфо."* 2021. Vol. 1.
6. Конвиз А.В., Семенов В.В., Ухов С.Б. *Механические свойства крупнообломочных грунтов с заполнителем // Основания, фундаменты и механика грунтов.* 1993. Vol. 1.
7. Вознесенский Е.А., Фуникова В.В., Бабенко В.А. *Особенности деформирования модельных крупнообломочных грунтов в условиях неравнокомпонентного трехосного сжатия // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова»,* 2013. № 4.
8. Кузнецов Н.Л., Верховин И.И. *Сравнительный анализ методов определения прочностных свойств крупнообломочных грунтов Непско-Ботуобинской антеклизы // Науки о Земле и недропользование.* 2019. Vol. 42, № 1. P. 41–54.
9. Шведов В.Н. *Исследование прочностных свойств обломочно-глинистых грунтов как оснований зданий и сооружений: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.02. Владивосток,* 1979.
10. Тулинов Р.Г. *Исследование основных факторов, определяющих сопротивление сдвигу крупнообломочных пород: дис. ... канд. геол.-мин. наук: 04.126. Москва,* 1970.
11. Рассказов Л.Н. *Сопротивление крупнообломочного грунта сдвигу при расчете гидротехнических сооружений на устойчивость: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.02. Москва,* 1966.
12. Соколов В.С. *Методика и результаты исследований инженерно-геологических свойств галечниковых пород при повышенных требованиях к основанию: дис. ... канд. геол.-мин. наук: 04.00.07. Москва,* 1974.
13. Добудько О.В. *Влияние механической прочности обломков на прочностные свойства обломочно-глинистых грунтов, используемых в качестве оснований зданий и сооружений: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.02. Владивосток,* 1993.
14. Федоров В.И. *Прогноз прочности и сжимаемости оснований из обломочно-глинистых грунтов. М.: Стройиздат,* 1988.
15. *Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями/ДальНИИС. - М.: Стройиздат,* 1989.
16. Болдырев Г.Г. *Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010. М.: ООО «Прондо»,* 2014.
17. Тер-Мартirosян З.Г., Мирный А.Ю. *Зависимость механических свойств грунтов от степени их неоднородности // Инженерная геология.* 2013. № 4. P. 60–67.
18. Бабенко В.А., Никифоров Н.В., Вознесенский Е.А. *Теоретические и методические аспекты экспериментального изучения состава и свойств песчано-глинистого заполнителя крупнообломочных грунтов // Инженерная геология.* 2012. № 5. P. 20–35.

ПРИМЕНИМОСТЬ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В МАССИВАХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ПРАКТИКЕ

Н.Г. Волков, И.С. Соколов

ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС», 119331, г. Москва, пр. Вернадского, д. 29, офис 1104
E-mail: n.volkov@giscpt.com

Введение

При инженерно-геологических изысканиях многолетнемерзлые грунты (ММГ) в массиве, как правило, не являются объектом исследования в полевых испытаниях. Изыскания ограничиваются изучением свойств ММГ с помощью инженерно-геологического бурения скважин с отбором проб и последующим лабораторным исследованием физико-механических свойств, термометрией в скважинах, реже геофизическими исследованиями и испытаниями свай статическими или динамическими нагрузками. Полевые методы изучения свойств ММГ направлены на получение информации о деформационных и прочностных характеристиках. Однако, полевых испытаний ММГ не проводится ввиду сложности или очень часто невозможности таких работ в тяжелых условиях Арктики. К сожалению, опробование ММГ при бурении также осложнено трудностями логистики, и лабораторные испытания проводятся на восстановленных образцах мерзлого грунта, свойства которых сильно отличаются от свойств ненарушенного грунта в массиве.

В современных инженерно-геологических и геотехнических изысканиях роль статического зондирования достаточно велика. В области статического зондирования за последние десятилетия были разработаны самые передовые технологии, как в технике, так и в программном обеспечении. В технике был сделан огромный шаг вперед по увеличению задавливающего усилия на зонд, что открыло новые горизонты применения статического зондирования, в том числе применение на ММГ. Статическое зондирование является эффективным в сравнении с другими полевыми методами испытаний грунтов, как по временным, так и по материальным затратам. Это особенно актуально в условиях Крайнего Севера. Применение статического зондирования на ММГ не распространено широко в виду малого опыта выполнения зондирования в полевых условиях. Также распространено мнение, что статическое зондирование не применимо на мерзлых грунтах в виду их несжимаемости, или ограничено применением только на пластично-мерзлых грунтах [11]. Однако, практический опыт авторов, собранный за последние 10 лет, доказывает обратное утверждение о том, что статическое зондирование применимо на мерзлых грунтах, что высокая льдистость не является препятствием для пенетрации зонда в массив мерзлого грунта, что низкие отрицательные температуры для природных ММГ не создают условия несжимаемости мерзлых грунтов.

К вопросу о разделении мерзлых грунтов на твердомерзлые и пластично-мерзлые

Мерзлые грунты разделяют на твердомерзлые и пластично-мерзлые [8]. Твердомерзлый грунт – дисперсный грунт, прочно сцементированный льдом, характеризуемый относительно хрупким разрушением, практически несжимаемый под внешней нагрузкой. Пластично-мерзлый грунт – дисперсный грунт, сцементированный льдом, обладающий вязко-пластичными свойствами и сжимаемостью под внешней нагрузкой. В соответствии с ГОСТ 25100-2011 разделение ММГ на пластично-мерзлые и твердомерзлые производится на основе коэффициента сжимаемости $m_f = 0,01 \text{ МПа}^{-1}$, где твердомерзлые грунты обладают коэффициентом $m_f \leq 0,01 \text{ МПа}^{-1}$, а пластичномерзлые – $m_f > 0,01 \text{ МПа}^{-1}$ (рис. 1).

Данное разделение четкое и не имеет противоречий. Оно было введено достаточно давно, в семидесятые годы прошлого столетия. Однако, в последней редакции ГОСТ предлагается разделять мерзлые грунты на пластично-мерзлые и твердомерзлые не только по коэффициенту сжимаемости m_f , но и по температурной границе твердомерзлого состояния грунта (T_h) для каждого типа грунта соответственно (рис. 1). Таким образом, если пластичномерзлый грунт охладить на несколько градусов, то он станет твердомерзлым. Другими словами, при охлаждении мерзлого грунта он перейдет из сжимаемого в несжимаемое состояние. Объяснение данному феномену лежит в явлении незамерзшей воды в мерзлых грунтах. При высоких значениях отрицательной температуры содержание

В.3.2 По состоянию незасоленные мерзлые грунты подразделяют на разновидности в соответствии с таблицей В.12

Т а б л и ц а В.12

| Грунты | Разновидность грунта | | |
|--|---|--|----------------------------------|
| | Твердомерзлый ($m_f \leq 0,01 \text{ МПа}^{-1}$) при $T < T_h$, °С | Пластично-мерзлый ($m_f > 0,01 \text{ МПа}^{-1}$) при T , °С | Сыпуче-мерзлый при $T < 0$ °С |
| Скальные и полускальные | $T_h = 0$ | — | — |
| Крупнообломочные | $T_h = 0$ | — | — |
| Пески гравелистые, крупные и средней крупности | $T_h = -0,1$ | $T_h < T < T_{bf}$ при $S_{ff} < 0,8$ | При $S_{ff} \leq 0,15$ |
| Пески мелкие и пылеватые | $T_h = -0,3$ | | |
| Глинистые грунты: - супесь - суглинок - глина | $T_h = -0,6$ $T_h = -1,0$ $T_h = -1,5$ | $T_h < T < T_{bf}$ | При $S_{ff} \leq 0,15$ |

Примечание — T_h — температурная граница твердомерзлого состояния грунта; T — температура грунта.

Рис. 1. Применимость статического зондирования для разновидностей мерзлых грунтов в соответствии с классификацией ГОСТ 25100-2020

незамерзшей воды достаточно высокое, что приводит к пластичному поведению при деформации и разрушении. Если же температура снижается, содержание незамерзшей воды уменьшается, а льдистость увеличивается, что ведет к увеличению твердости мерзлого грунта. Это верно. Однако, это не имеет отношение к сжимаемости мерзлого грунта.

Следует отметить, что разделение мерзлых грунтов на твердомерзлые и пластичномерзлые крайне неудачное. Все равно, что яблоки делить на красные и кислые. Однако, большинство специалистов не обращают на это внимание. Пластично-мерзлый грунт характеризуется пластичным разрушением, а твердомерзлый – хрупким. Логично, твердомерзлые грунты в таком случае назвать «хрупкомерзлыми», а слова «хрупкий» и «пластичный» являются антонимами по отношению друг к другу. Однако, слово «хрупкий» ассоциируется со словами «непрочный, недолговечный», что не характеризует мерзлые грунты адекватно. В свою очередь, слово «твердый» имеет несколько значений. Первое значение – это фазовое состояние в ряду «твердый-жидкий-газообразный». Оно точно не рассматривается в изначальном контексте твердомерзлых грунтов, которые выделялись по коэффициенту сжимаемости. Однако подразумевается при замене критерия разделения с коэффициента сжимаемости на температурную границу твердомерзлого состояния грунта (T_h). Если грунт имеет температуру ниже определенного значения, значит у него малое количество незамерзшей воды (жидкая фаза) и большое количество льда (твердая фаза). Значит грунт становится твердомерзлым. Второе значение – это характеристика твердости материала. Твердость – свойство материала сопротивляться внедрению более твердого тела (индентора). Твердость определяется как отношение величины нагрузки к площади поверхности, площади проекции или объему отпечатка. Антоним слову «твердый» в данном значении будет слово «мягкий». Очевидно, что термин «мягкомерзлый» не подходит для описания мерзлого грунта. Обобщая вышесказанное, стоит подчеркнуть о соотношении рассматриваемых характеристик – «твердый-мягкий» и «хрупкий-пластичный». Материал может быть охарактеризован по этим двум шкалам. Приведем для примера материалы, сочетающих предельные характеристики. Всего их четыре: 1) твердый и пластичный — сталь, железо; 2) твердый и хрупкий — алмаз, чугун, стекло, горные породы; 3) мягкий и пластичный — пластилин, глина; 4) мягкий и хрупкий — галлий, медь, клубничное желе. Как видно, материал может одновременно являться твердым и пластичным. Это касается и мерзлых грунтов. Учитывая, что разделение на твердомерзлые и пластичномерзлые основано на коэффициенте сжимаемости, который не характеризует ни твердость, ни пластичность, можно утверждать, что разделение на твердомерзлые и пластичномерзлые является допустимым по отношению к сжимаемости грунтов, но не отражает их твердости или пластичности. Также разделение на твердомерзлые и пластичномерзлые грунты по их температуре не будет характеризовать мерзлые грунты ни по твердости, ни по пластичности, ни по сжимаемости. В таком случае разделение, где грунты с температурой выше T_h пластичномерзлые, а с температурой ниже T_h – твердомерзлые, является условным. Никакой характеристики по сжимаемости, как и по твердости и пластичности, принимать по таблице на рис. 1 не следует.

В терминологии инженерного мерзлотоведения (permafrost engineering) англоязычного зарубежья деление на пластичномерзлый и твердомерзлый отсутствует. Термины «plastic frozen» и «hard frozen» вводились специалистами из СССР и России, однако так и не прижились в английском профессиональном языке и не встречаются в опубликованной иностранной литературе.

К вопросу о сжимаемости мерзлых грунтов

Сжимаемость мерзлого грунта обусловлена наличием пор, заполненных не незамерзшей водой, а водяным паром. Именно эти поры обуславливают сжимаемость мерзлых грунтов.

Из кристаллографии льда известно, что при замерзании воды может формироваться лед с различной формой кристаллов – гексагональной, кубической, аморфной и др. Форма кристаллов льда зависит от условий, в которых замерзает вода. Так, например, по форме кристаллов снежинок можно определить в каких условиях они сформировались в атмосфере и использовать эти данные в метеорологии. При кристаллизации льда в грунте, при его промерзании, основную роль играют поры грунта и скорость промерзания.

При наличии глинистых и пылеватых частиц в грунте начинает формироваться игольчатый лед («needle ice»). Игольчатый лед в виду своей красоты и необычными формами достаточно широко отображен сегодня в литературе и социальных сетях интернета. Условия его формирования – наличие тонких капилляров и достаточное время на рост таких кристаллов. Схожие формы наблюдаются и у снежинок. В виду того что формируется игольчатый лед, в грунте формируются пустоты, которые заполнены воздухом. При росте игольчатых кристаллов льда в виду их анизотропии формируется зона отрицательного порового давления между формирующимися кристаллами льда. Для поддержания термодинамического равновесия эта зона заполняется водяным паром. Таким образом, происходит разрыхление грунта из-за его промерзания. Анизотропия роста кристаллов льда является причиной сегрегационного льдовыделения. Это ведет как к разрыхлению грунта, так и формированию «рыхлого льда».

При мгновенном промерзании воды формируется лед с аморфной структурой. Если воду заморозить жидким азотом (мгновенное промерзание), то тогда кристаллы льда не успеют сформироваться, а сформируется аморфный лед с плотностью воды.

При быстром промерзании воды формируется лед с массивной структурой. В данном случае лед кристаллизуется быстро, а кристаллы льда не успевают расти по осям, и степень анизотропии достаточно низка. В таком случае образуется массивная криотекстура, а поры, заполненные водяным паром, не успевают формироваться.

Если промерзание происходит достаточно долгое время, в течение многих дней или лет, тогда лед успевает проявить анизотропию роста и сформировать поры, заполненные водяным паром. Чем медленнее промерзание, тем выше степень анизотропии ледяных кристаллов, тем сильнее разрыхляется лед и грунт.

Подтверждение вышеизложенного можно найти в опубликованных источниках. В частности, в работе [1] на стр. 245 приводится сравнение характеристик образцов льда искусственных (быстро-промороженных) и природных (многолетнепромороженных). Из приведенных данных видно, что искусственно приготовленные образцы имели плотность от 0,90 до 0,913 г/см³, что очень близко к плотности чистого льда – 0,917 г/см³. А у природных образцов льда плотность была существенно меньше, а именно 0,87 г/см³. Именно эта небольшая разница дает возможность осуществить пенетрацию зонда. Лобовое сопротивление при проходке льда у зонда очень высокое и составляет первые десятки мегапаскалей. Но для современного оборудования такие значения регулируются российскими нормативными документами [7], и не являются высокими и недостижимыми значениями.

Резюмируя вышеизложенное, именно благодаря пористости льда мерзлые грунты сжимаемы, а статическое зондирование мерзлых грунтов возможно.

Практический опыт применения статического зондирования авторами

За последние 10 лет с 2014 года было проведена огромная практическая работа по применению статического зондирования в криолитозоне (рис. 2).

На рисунке 1 представлена карта распространения многолетнемерзлых грунтов и номерами помечены площадки исследований, где выполнялось статическое зондирование с измерением температуры:

1. 2014 — Лабитнанги, Салехард (Городская территория);

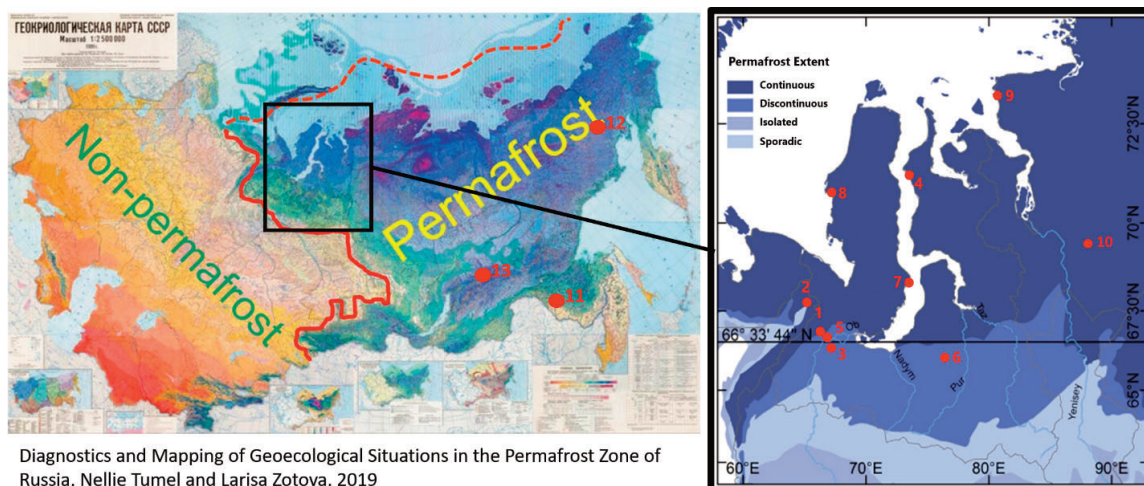


Рис. 2. Практический опыт статического зондирования, полученный непосредственно авторами в криолитозоне за 2014-2024 годы

2. 2015 — Воркута (РЖД, ст. Полярный Урал);
3. 2016, 2024 — Салехард (Площадки строительства);
4. 2017, 2021 — Гыданский п-ов (Арктик СПГ-2);
5. 2018 — Долина р. Обь (мост через р. Обь);
6. 2019, 2024 — Новый Уренгой (Жилой многоэтажный дом, детский сад);
7. 2020 — Мыс Каменный (Каменномыское и Северо-Каменномыское месторождения);
8. 2021 — Шарапов Шар (Крузенштернское месторождение);
9. 2021 — Диксон (Бухта Север);
10. 2021, 2024 — Норильск (Площадки);
11. 2016-2020 — Свободный, Амурская область (АГПЗ, АГХК);
12. 2023 — Магаданская область (Наталкинское м/р);
13. 2024 — Иркутская область (Дамба хвостохранилища).

Подробное описание результатов исследований представлены в различных публикациях авторов [3, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21].

Использовались специальные зонды с различными датчиками, измеряющими удельное сопротивление вдавливанию конуса наконечника зонда, сопротивление грунта вдоль муфты трения, температуру, поровое давление, электропроводность и другие. Также впервые были проведены дилатометрические испытания в мерзлых грунтах.

Общий погонный метраж статического зондирования в криолитозоне на 13 площадках составил 14120 погонных метров, включая мерзлые грунты – 2960 погонных метров. В процессе этих испытаний было выполнено 1810 испытаний на рассеивание порового давления и измерение температуры грунта со стабилизацией. Общее количество скважин (точек) статического зондирования составило 437 скважин. Максимальная глубина статического зондирования в массиве многолетнемерзлых грунтов без вспомогательного разбуривания составила 62 погонных метра (см. рис. 2, пункт 5).

Минимальная температура многолетнемерзлых грунтов, опробованных статическим зондированием, составила -6°C (см. рис. 2, пункт 4). Это позволяет утверждать, что статическое зондирование возможно для твердомерзлых грунтов, если за критерий выделения твердомерзлого грунта берется температура.

На различных площадках (см. рис. 2, пункты 6, 8, 10, 11, 13) были опробованы льдистые многолетнемерзлые грунты. На этих площадках льдистость мерзлых грунтов подтверждалась пробоотбором грунтов, как при помощи пресса для статического зондирования, так и буровыми установками. Впервые было показано, что тонкостенные пробоотборники типа трубок Шелби применимы на глинистых высокольдистых грунтах. Максимальная глубина пробоотбора с помощью оборудования для статического зондирования, подтвержденная практическим опытом, составляет 20 метров.

Засоленные грунты на мелководье были опробованы с помощью статического зондирования на различных площадках (см. рис. 2, пункты 4, 7, 8, 9). В частности, была измерена их отрицательная температура, определено их фазовое состояние.

Несколько практических инженерных задач были решены с помощью статического зондирования. В частности, было выполнено статическое зондирование с железнодорожной платформы через гравийную насыпь в районе города Воркута (см. рис. 2, пункт 2) [16]. Также с помощью статического зондирования была проверена работа термостабилизаторов и оценена их эффективность (см. рис. 2, пункт 3) [12, 18].

Наряду с широким практическим применением статического зондирования в криолитозоне, за последние 10 лет было также разработано несколько новых методик определения различных параметров свойств и состояния мерзлых грунтов [2, 3, 4, 5, 6, 13], включая температуру грунта, длительную прочность, льдистость за счет видимых включений льда, деградацию мерзлого грунта и др.

Литература

1. Аксенов В.И., Геворкян С.Г., 2023. Засоленные и льдистые мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений. МАФ, Москва. 280 С.
2. Блажко А.В., Волков Н.Г., Кольцова В.М., Лагоша Д.В. Определение фазового состояния грунта при измерении температуры методом статического зондирования. / Блажко А.В. // Российский форум изыскателей. Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции. М.: «КДУ», «Добросвет». 2022. - с. 33-39.
3. Волков Н.Г., Соколов И.С. Сравнение температурных замеров грунтов с помощью статического зондирования и скважинной термометрии / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Инженерные изыскания. – 2018. – № 7–8. – С. 16–24.
4. Волков Н.Г., Соколов И.С. Методика расчета несущей способности сваи в многолетнемерзлых грунтах на основе измерений релаксации напряжения, полученных с помощью статического зондирования / Н.Г. Волков // Сборник докладов Межд. н.-т. конф. «Современные технологии проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах». – М., 2018, – С. 36-42.
5. Волков, Н. Г., Соколов, И. С. Геотехнический мониторинг мерзлого грунтового основания с помощью статического зондирования / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 5. – С. 52–59.
6. Волков Н.Г., Соколов И.С. Расчет несущей способности сваи на основе определения длительной прочности в массиве мерзлых грунтов методом статического зондирования / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Геотехника. – 2019. – № 1. – С. 68–78.
7. ГОСТ 19912-2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием (Издание с Изменением N 1).
8. ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация (с Поправками).
9. Лагоша Д.В., Волков Н.Г., Соколов И.С. Полевые испытания и отбор проб мерзлого грунта с помощью статического зондирования. // Грунтоведение. - 2021. - №1. - с. 53-64
10. Лагоша Д.В., Галкин С.Ю., Волков Н.Г., Соколов И.С. Сравнение результатов определения сопротивления недренированному сдвигу грунтов различными полевыми методами. / Лагоша Д.В. // Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения. Материалы Общероссийской научно-практической конференции и выставки. М.: ООО «Геомаркетинг». 2023. – 67 с. - с. 51-60.
11. Рыжков И. Б., Исаев О.Н., 2010. Статическое зондирование грунтов. АСВ, Москва.
12. Соколов И. С. Диагностика с помощью статического зондирования мерзлого грунтового основания, охлажденного термостабилизаторами / И.С. Соколов // Научный вестник Ямало-ненецкого автономного округа – устойчивое развитие Арктики. – 2019. – № 1 (102) – С. 65–73.
13. Соколов И.С. Методика определения прочностных свойств мерзлых грунтов статическим зондированием: дис. ... канд. геол.-минер. наук: 25.00.08. - Моск. гос. университет, Москва, 2020 – 149 с.
14. Соколов И.С., Лагоша Д.В., Волков Н.Г., Исаев В.С. Определение длительной прочности мерзлого грунта статическим зондированием. / Соколов И.С. // Материалы 5-ой конференции «День науки 2020». Звенигородская биостанция МГУ им. М.В. Ломоносова. М.: Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. 2020. – 119 с. - с. 98-104.
15. Lagosha D., Volkov N. and Sokolov I. 2022. Comparison of frozen soil strength characteristics by cone penetration and triaxial compression testing. Proceedings, 5th International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'22). – Italy, Bologna. – pp. 491–496.

16. Sokolov I.S., Volkov N.G., Isaev V.S., 2016. *Cone Penetration Testing for Railways on Permafrost. Proceedings XI International Conference on Permafrost, 2016, pp. 1144-1145.*
17. Sokolov I. and Volkov N. 2022. *Long-term strength determination of frozen soils by CPT. Proceedings, 5th International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'22). – Italy, Bologna. – pp. 226–229.*
18. Volkov N., Sokolov I. and Jewell R., 2017. *Investigation by Cone Penetration Tests of Piled Foundations in Frozen Soil Maintained by Thermosyphons. American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences, Vol. 31, No. 1, pp. 40-58.*
19. Volkov N., Sokolov I., Jewell R., 2018. *Cone penetration testing of permafrost soils. Proceedings 5th European Conference on Permafrost, 2018, Chamonix Mont Blanc, France, pp. 215-216.*
20. Volkov N., Sokolov I., Jewell R., 2018. *CPT Testing in Permafrost. Proceedings 4th International Symposium on Cone Penetration Testing. CPT'18, Netherlands, Delft, 2018, pp. 1258-1268.*
21. Volkov N., Sokolov I. and Jewell, R. 2022. *Practical experience with cone penetration in frozen soils. Proceedings, 5th International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'22). – Italy, Bologna. – pp. 741–746.*

ВЛИЯНИЕ МОДЕЛИ ГРУНТА НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА КОНЕЧНОЙ ОСАДКИ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТА МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

А.А. Горлов, И.К. Фоменко

Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе (МГРИ),
117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23
E-mail: andrey.gorlov10@yandex.ru, ifolga@gmail.com

Введение

В современных условиях повсеместной урбанизации и интенсивного освоения территорий новые подходы к оценке параметров ЛТС становятся всё более актуальны. Так в геотехнических расчётах широко используются различные модели грунта, среди которых наиболее популярны линейно упругопластическая модель Mohr-Coulomb (MC) и модель упрочняющегося грунта Hardening Soil (HS). Выбор модели грунта оказывает значительное влияние на результаты расчетов и, следовательно, на принимаемые проектные решения.

Одним из важнейших параметров ЛТС является конечная осадка основания фундамента, корректная оценка данной величины наиболее ответственная задача при проектировании сооружения. Ошибки в расчетах конечной осадки приводят к неравномерным деформациям основания, повреждению конструктивных элементов сооружения и, как итог, к значительным финансовым затратам. Одним из наиболее важных факторов, определяющих точность расчетов осадки, является выбор модели поведения грунта.

В данной работе представлены расчёты конечной осадки основания фундамента с использованием различных моделей поведения грунта, а именно MC (Mohr-Coulomb), HS (Hardening Soil) и НМС (Hardening Mohr-Coulomb). Расчёты выполнялись в двух современных программных комплексах: Plaxis и OptumG2.

Целью работы является анализ различий в значениях конечной осадки, получаемых с использованием моделей MC, HS, НМС, а также особое внимание уделено влиянию на результат, линейного изменения модуля упругости с глубиной при использовании модели MC. Учёт изменения данного параметра реализован в программном комплексе OptumG2.

Методы исследования

Модель Mohr-Coulomb. Математическая модель Mohr-Coulomb описывает упруго идеально пластическое поведение и линейный критерий прочности материалов, прочность которых на сжатие существенно превышает прочность на растяжение. Пожалуй, эта модель универсальная, так как она лежит в основе многих модификаций множества моделей, описывающих поведение и прочность различных материалов: грунтовых и скальных пород, бетонов, композитных материалов и пр. [5]. Модель прочности впервые была предложена Ш. Кулоном в XVIII в. В простейшей постановке получила свое развитие в работах К. Мора в XIX в. в виде графического метода анализа напряжений при сложном напряженном состоянии [1].

Модель поведения Mohr-Coulomb используется для описания деформирования грунтов, которое в данной модели имеет линейный характер, что означает, что деформации грунта прямо пропорциональны уровню напряжений σ и изменяются в соответствии с заданным модулем деформации E грунта.

Существуют различные модификации данной модели, учитывающие те или другие характеристики грунтов, например поровое давление, анизотропию и т.д. [1].

Модель Hardening Soil. Модель HS описывает нелинейное поведение грунта в условиях сложонапряженного состояния грунта, а также моделирует механизм его разрушения, который базируется на модели прочности Mohr-Coulomb [9]. При расчете деформированного состояния, как и ряд других шатровых моделей, модель HS учитывает две компоненты упрочнения – функции сдвигового упрочнения (shear hardening) и объемного упрочнения при изотропном нагружении (volumetric hardening) [9].

Гиперболическая зависимость изменений деформаций от действующих напряжений лежит в основе модели упрочнения HS. При увеличении напряженного состояния за счет напряжений сжатия в грунте (девиаторное напряжение), в процессе его деформирования, в том числе в результате накопления пластических деформаций, неизбежно происходит увеличение жесткости (упрочнение). Это явление хорошо отражается в условиях трехосного нагружения дренированного грунта, ранее сформулированное R.L. Kondner [1].

Модель Hardening Mohr-Coulomb. Модель Hardening Mohr-Coulomb (HMC) была разработана для устранения некоторых недостатков стандартной модели Mohr-Coulomb. Впервые данная модель была предложена Мьюиром Вудом в 2004 году с учетом трёхосного напряжённого состояния, а позже расширена для общего напряжённого состояния Догерти и Мьюиром Вудом в 2013 году [8].

Модель HMC сочетает преимущества классической линейно-упругопластической модели Mohr-Coulomb с дополнительными параметрами, которые позволяют учесть нелинейное упрочнение грунта в процессе нагружения. Одним из ключевых улучшений является возможность описания поведения грунта в условиях сложных схем напряжённого состояния, таких как циклические нагрузки или влияние многокомпонентного напряжения.

Преимущества модели HMC:

1. Учёт нелинейности деформаций грунта;
2. Учёт изменяющейся нагрузки на грунты основания фундамента;
3. Зависимость свойств грунта от давления;
4. Учёт пластичности.

В таблице 1 приведены входные параметры для вышеописанных моделей грунтов.

| Таблица 1 | | | | | | |
|--|---|-------------------|---------------|-----------------|----|-----|
| Основные параметры моделей Mohr-Coulomb, Hardening Soil и Hardening Mohr-Coulomb | | | | | | |
| Параметр | Наименование | Размерность | Модель грунта | | | |
| | | | MC | MC ¹ | HS | HMC |
| E_{50}^{ref} | Секущий модуль упругости при 50% значения ($\sigma_1 - \sigma_3$) | кН/м ² | | | | |
| E_{oed}^{ref} | Тангенциальный модуль упругости | | | | | |
| E_{ur}^{ref} | Модуль упругости при разгрузке | | | | | |
| E | Модуль упругости на кровле | | | | | |
| | Модуль упругости на подошве | | | | | |
| ν_{ur} | Число Пуассона | – | | | | |
| m (power) | Показатель степени | – | | | | |
| K_0 | Коэффициент бокового давления грунта | – | | | | |
| p^{ref} | Опорный уровень напряжений | кН/м ² | | | | |
| c | Эффективное сцепление | | | | | |
| ϕ (phi) | Эффективный угол внутреннего трения | град | | | | |
| ψ (psi) | Угол дилатансии | | | | | |

Примечание: Зелёным цветом отмечены используемые в модели параметры, не относящиеся к выбранной модели грунта параметры отмечены красным цветом. ¹ – модель Mohr-Coulomb с учётом линейного изменения модуля упругости грунта с глубиной.

Характеристика объекта исследования

Расчет осадки основания фундамента выполнялся на примере сооружения, имеющего прямоугольную конфигурацию в плане. Тип фундамента – плитный, ширина 10 м, нагрузка на фундамент – 200 кН/м². Расчетная схема представлена на рисунке 1.

Толща грунтов основания сложена песками разной крупности и имеет следующее строение: первый от поверхности слой (РГЭ-1) представлен песками средней крупности, мощностью 5 метров,

ниже залегают пески мелкие (РГЭ-2) мощностью 17 метров. В таблице 2 представлены параметры характеризующие физико-механические свойства грунтов, которые использованы в расчётах конечной осадки основания [4].

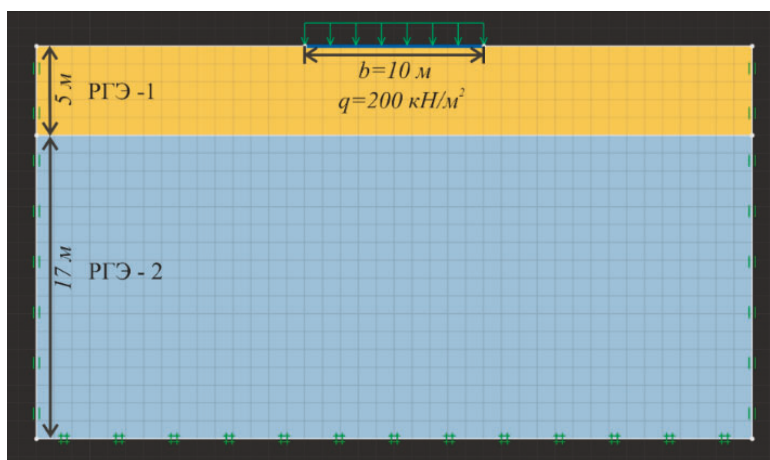


Рис. 1. Расчётная схема с указанием некоторых параметров грунтов основания и фундамента

Таблица 2

Параметры описывающие физико-механические свойства грунтов, используемые в расчётах

| Глубина, м | γ кН/м ³ | c' , кПа | ϕ' , ° | MC (Plaxis; OptumG2) | HS (Plaxis)/ HMC (OptumG2) | | | MC ¹ (OptumG2) |
|------------|----------------------------|------------|-------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|------|-----------------------------|
| | | | | E'_{ref} , МПа | $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}$, МПа | E_{ur}^{ref} , МПа | m | E'_{ref} ² МПа |
| 0-5 | 18 | 0 | 39 | 20 | 88,6 | 265,8 | 0,69 | к. 20 – п. 70 |
| 5-22 | 18 | 0 | 32 | 16 | 32,6 | 97,8 | 0,57 | к. 16 – п. 34 |

Примечание: ¹ – модель Mohr-Coulomb с учётом линейного изменения модуля упругости грунта с глубиной.
² – в таблице даны значения модуля упругости грунта на кровле и подошве слоя.

В процессе исследования было выполнено пять вариантов расчётов (рис.3):

- 1.) В расчёте использована модель грунта Hardening Mohr-Coulomb (OptumG2).
- 2.) В расчёте использована модель грунта Hardening Soil (Plaxis).
- 3.) В расчёте использована модель грунта Mohr-Coulomb (OptumG2) с учётом линейного изменения модуля упругости грунта с глубиной ($E'_{ref} \neq const$).
- 4.) В расчёте использована модель грунта Mohr-Coulomb (OptumG2) при условии $E'_{ref} = const$.
- 5.) В расчёте использована модель грунта Mohr-Coulomb (Plaxis) при условии $E'_{ref} = const$.

Для учета линейного изменения модуля упругости с глубиной в расчетах необходимо задать два значения модуля упругости: одно для кровли расчетного геологического элемента (РГЭ) и другое для его подошвы.

Обсуждение результатов

Результаты расчётов конечной осадки основания фундамента с использованием разных моделей грунта представлены на рисунке 2. Цвет маркера соответствует применённой модели грунта при расчёте, рядом указана величина конечной осадки основания фундамента в метрах.

Сравнение результатов показывает, что наименьшее значение конечной осадки основания (0,035 м) получено с использованием модели Hardening Mohr-Coulomb (HMC) в программном комплексе OptumG2. Применение модели Hardening Soil (HS) в программном комплексе Plaxis дало результат конечной осадки основания 0,052 м. Конечная осадка, рассчитанная с применением модели Mohr-Coulomb (MC) в OptumG2 с учётом линейного изменения модуля упругости грунта с

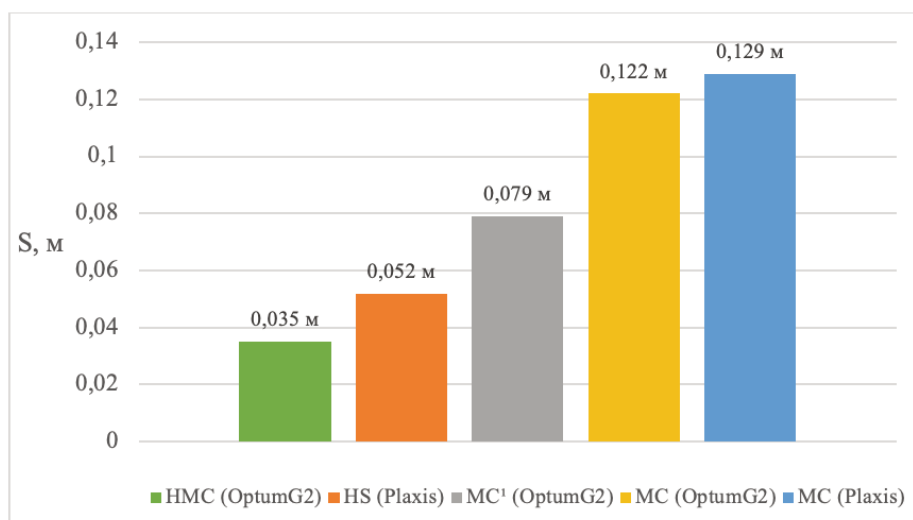


Рис. 2. Значения конечной осадки S в зависимости от используемой в расчёте модели грунта

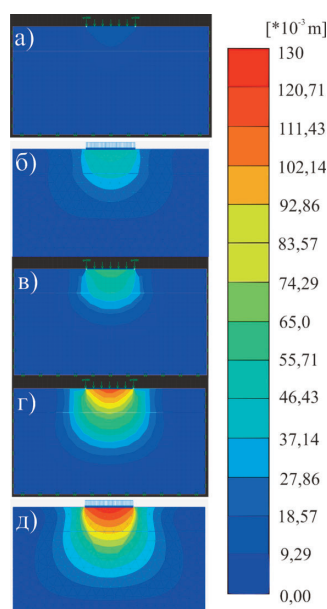


Рис. 3. Результаты расчётов конечной осадки основания фундамента: а) Hardening Mohr-Coulomb (OptumG2); б) Hardening Soil (Plaxis); в) Mohr-Coulomb (OptumG2) $E \neq \text{const}$; г) Mohr-Coulomb (OptumG2); д) Mohr-Coulomb (Plaxis)

глубиной, составляет 0,079 м. Это значение больше, чем при использовании модели НМС и HS, однако, расчёты конечной осадки основания с применением классической модели MC в Plaxis и OptumG2 дают результаты значительно отличающиеся от вышеизложенных, 0,129 м и 0,122 м соответственно.

Заключение

Выполненное исследование демонстрирует значительное влияние выбора модели грунта на результаты расчёта конечной осадки основания фундамента. Сравнение моделей Hardening Soil, Mohr-Coulomb и Hardening Mohr-Coulomb показало, что использование более сложных нелинейных моделей грунта, таких как НМС и HS, позволяет исключить завышение значений конечной осадки основания. Кроме того, учёт линейного изменения модуля упругости с глубиной, реализованный в программном комплексе OptumG2, позволяет повысить точность модели MC, что весьма ценно при условии относительной простоты определения вводимых в модель параметров.

В конечном счёте выбор модели грунта определяется необходимостью достижения максимальной точности результата при минимальных затратах на его получение. В этом отношении модель Mohr-Co-

и σ_{omb} имеет очевидные преимущества в сравнении с нелинейными моделями грунта, так как позволяет получить достоверные результаты при минимальном количестве вводимых в модель параметров.

Литература

1. Кургузов К.В., Фоменко И.К. *Основополагающие математические модели грунтов в практике геотехнического моделирования // Естественные и технические науки. 2019. N5. с. 240-247.*
2. Орехов В.В., Орехов М.В. *Использование модели упрочняющегося грунта для описания поведения песка различной плотности при нагружении. // Вестник МГСУ. 2014, № 2. – С. 91–97.*
3. Строкова Л.А. *Определение параметров для численного моделирования грунтов. // Известия Томского политехнического университета. 2008, т. 313, № 1. – С. 69–74.*
4. Hutapea, Edward & Nonaka, Takeshi & Julijanto, Rudi & Sin, Wong. *Application of 3-D Finite Element Analysis on Settlement of Tank on Reclamation. Conference: International Symposium on Advances in Foundation Engineering 2013. S. 179-184.*
5. K Krabbenhoft, AV Lyman, J Krabbenhoft (Editors). *OptumG2: Materials, 2016.*
6. Labuz J.F., Zang A. *Mohr–Coulomb failure criterion. Rock Mechanics and Rock engineering. 2012, Vol. 45, No. 6. – P. 975–979.*
7. Pramthawee P., Jongradist P., Kongrkitkul W. *Evaluation of hardening soil model on numerical simulation of behaviors of high rockfill dams. Sonklanakarin Journal of Science and Technology. 2011, Vol. 33, No. 3. – P. 325-10*
8. Schanz T. Vermeer P.A., Bonnier P.G. *The hardening soil model: formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics. 10 years of PLAXIS. Balkema, Rotterdam, 1999. – P. 281–296.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СРЕДСТВО РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРЕДЕЛАХ ТЕХНОГЕННОГО ОБЪЕКТА

Е.В. Дробинина, П.А. Белкин

Научно-исследовательская лаборатория инженерно-экологических исследований геологического факультета
ПГНИУ, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15
E-mail: alenadrobina@yandex.ru

Введение

Изучение техногенных объектов осложнено включением в их развитие наряду с природными факторами, антропогенного, влияние которого зачастую сложно оценить и прогнозировать. В пределах городских и градопромышленных агломераций возможна нежелательная активизация природных процессов при взаимодействии с техногенными, что часто выражается в негативном влиянии на объекты экономики вплоть до возникновения чрезвычайных ситуаций и техногенных аварий. В таких условиях индикаторами геологической опасности может выступать состояние геологической среды [1].

Потому изучение состояния техногенного объекта как геологической среды, функционирующей под влиянием природных и техногенных факторов, является неотъемлемой частью обеспечения его безопасного функционирования. Весьма успешно себя зарекомендовали методы компьютерного моделирования, позволяющие исследовать объект посредством симуляций, не нарушая и без того хрупкое равновесие в системе природа-человек.

Цель данного исследования: восстановление истории формирования донного осадка техногенного объекта и установление временных периодов формирования слоев осадка с применением 3D-моделирования.

Природно-техногенные условия изучаемой территории

Объектом исследования является техногенный пруд, расположенный на бывшей территории завода кальцинированной соды в г. Березники (Пермский край, Россия), созданный в 1960-1970 годах.

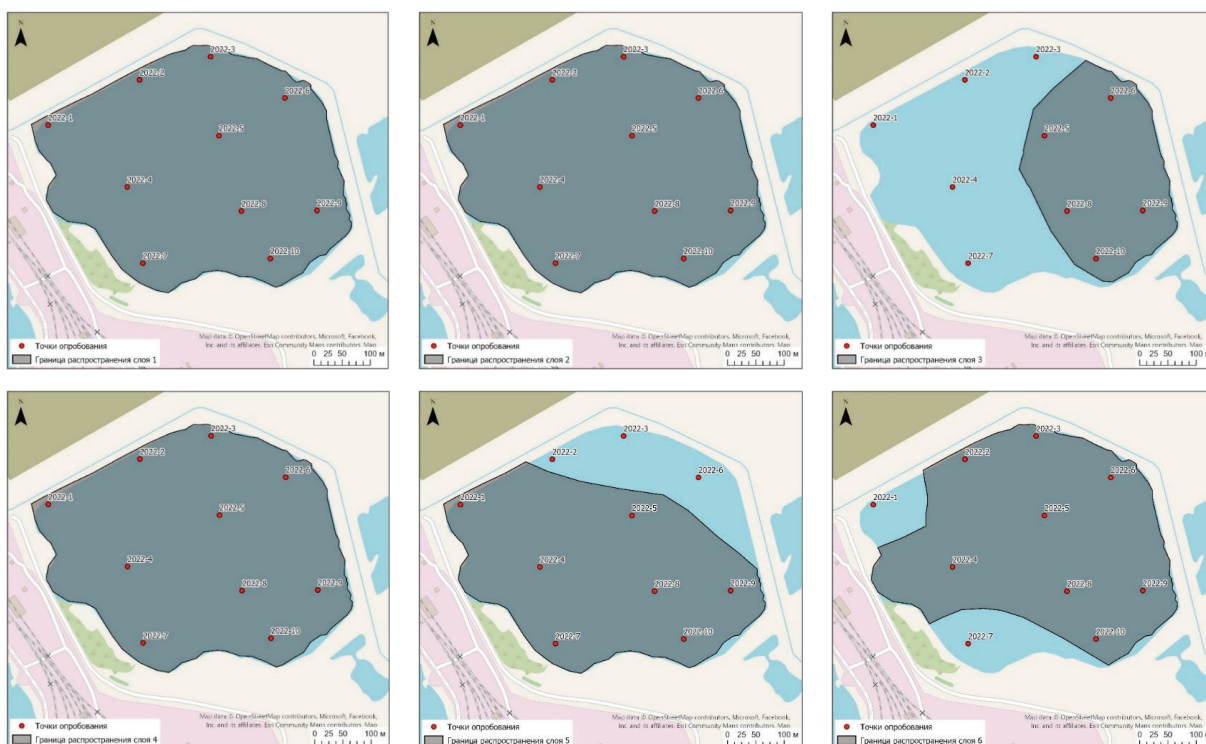


Рис. 1. Границы распространения слоёв 1–6

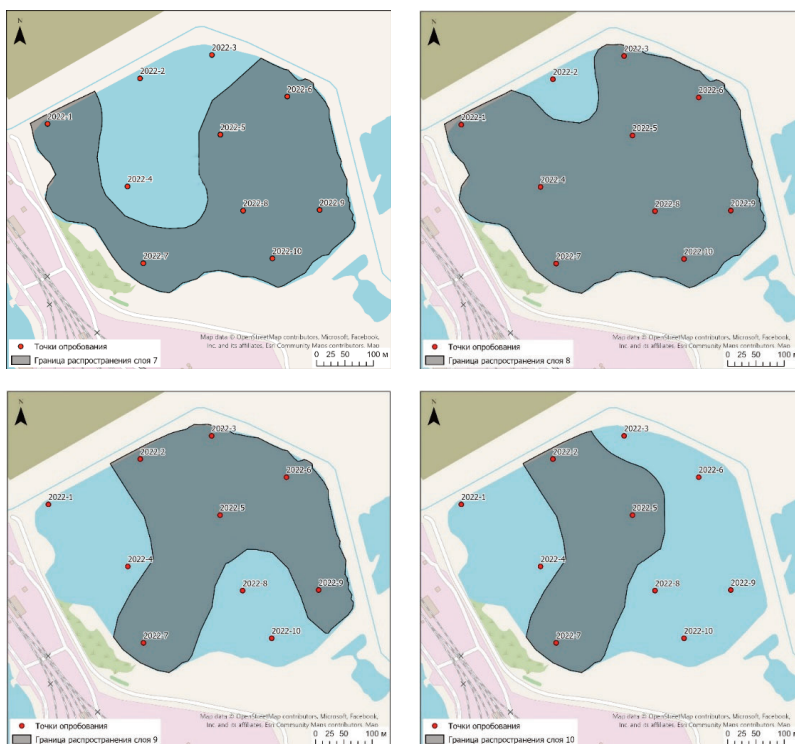


Рис. 2. Границы распространения слоёв 7–10

| Объем и масса донных отложений | | | Таблица 1 |
|--------------------------------|-----------------------|------------------|-----------|
| Слой | Объем, м ³ | Масса, т | |
| 1 | 44 447 | 115 563 | |
| 2 | 57 679 | 149 965 | |
| 3 | 12 906 | 33 555 | |
| 4 | 108 312 | 281 610 | |
| 5 | 20 190 | 52 494 | |
| 6 | 11 562 | 30 060 | |
| 7 | 33 059 | 85 955 | |
| 8 | 127 029 | 330 275 | |
| 9 | 50 763 | 131 984 | |
| 10 | 31 793 | 82 662 | |
| <i>Всего</i> | <i>497 740</i> | <i>1 294 124</i> | |

Объект находится в промышленном районе, где воздействие на окружающую среду связано с разработкой Верхнекамского месторождения солей – яркого примера месторождения водорастворимых руд, демонстрирующего все основные особенности и проблемы, связанные с их добычей и переработкой, в том числе на производственных площадках [3].

Ранее пруд служил временным резервным хранилищем отходов производства кальцинированной соды на время строительства основного шламонакопителя. После строительства основного хранилища исследуемая территория продолжала использоваться в качестве резервного резервуара. В пруд поступали сточные воды как с западной, так и с восточной сторон, а также из близлежащего канала отвода промышленных отходов, который собирал сточные воды с нескольких предприятий Березниковского промышленного района. Сегодня этот водоем находится в городской черте и вопрос безопасного функционирования данной сложной системы является открытым и требует решения.

В настоящее время водоем имеет почти однородную пятиугольную форму и окружен дамбами. Диаметр водоема составляет 500 м, площадь поверхности – 17 га. Толщина воды до донных отло-

Объем и масса донных отложений

| Временной интервал (ориентировочный) | Слои осадка | Объем (ориентировочный) |
|--------------------------------------|--------------|-------------------------|
| до 1970 г. | слои 10, 9 | 82 556 |
| 1970-1990 | слои 8, 7 | 160 088 |
| 1990-2000 | слои 6, 5, 4 | 140 063 |
| 2000-2017 | слои 3, 2 | 70 585 |
| 2017-н.в. | слой 1 | 44 447 |

жений меняется в течение года, но редко превышает 1 м. Основными источниками питания на протяжении всего существования водоема были атмосферные осадки и сброс сточных вод. В настоящее время приток сточных вод в пруд полностью прекращен. Видимой гидравлической связи с другими водоемами нет, однако на расстоянии 150 м к западу протекает главная водная артерия Пермского края – р. Кама, которая является важным источником водоснабжения изучаемого района [2].

Методика работы. Расчет объема и массы накопленного донного осадка

С целью количественного расчета массы и объема донных осадков, накопленных в изучаемом объекте, разработана объемная цифровая модель толщи осадков с применением программного обеспечения (ПО) ArcGIS. В качестве исходных данных для модели приняты общая мощность осадка по результатам натурных промеров, плановые границы водоёма на период обследования (2024 г.), результаты расчленения толщи осадка на слои посредством построения инженерно-геологических разрезов и химического и микроэлементного состава выделенных на разрезах слоев.

Согласно проведенной типизации, в строении осадка выделено 10 основных слоёв, выдержанных по всей площади техногенного водоёма, либо по значительной его части. Методом интерполяции на основе точечных данных определены границы распространения каждого изучаемого слоя в плане, а также вертикальные границ слоёв – «кровля» (верхняя граница слоя) и «подошва» (нижняя граница слоя). Границы распространения слоёв в плане приведены на рисунках 1-2.

Для слоёв 1–10 с помощью инструмента ПО ArcGIS «Разница поверхностей» (Surface Difference набора 3D Analyst), вычисляющего объем между двумя поверхностями в пределах площади, ограниченной полигоном, был определен объем пространства, расположенного между двумя анализируемыми растрами: подошвой и кровлей слоев.

Результаты исследования

Расчет массы произведен с использованием результатов определения плотности осадка. В результате исследований 27 проб плотность осадка варьировала в интервале 2,49-2,71 г/см³ при среднем значении 2,61 г/см³. Закономерных изменений плотности осадка с глубиной выявлено не было, измеренные значения распределялись случайно. В связи с вышеуказанным, для расчета массы осадка принято среднее значение плотности по всем пробам.

Расчитанные значения объема и массы накопленного осадка приведены в таблице 1. Общий объем накопленного донного осадка составил 497 740 м³, общая масса ~ 1 294 тыс. тонн.

Согласно ориентировочной временной шкале, построенной с применением анализа космических снимков, и данным по мощности осадка, можно представить следующую динамику накопления отхода по годам (рис.3, таблице 2). Для успешной визуализации всех слоев на схеме соотношение вертикального и горизонтального масштабов отрисовки осадка составляет 50:1. Максимальная мощность донного осадка до «природного дна» по данным промеров составила 4,20 м.

Выводы

Таким образом с привлечением 3D-моделирования как средства ретроспективного анализа данных, удалось выявить основные этапы в истории развития территории, на которой расположен современный техногенный водоём, которые коррелируются с периодами формирования осадка.

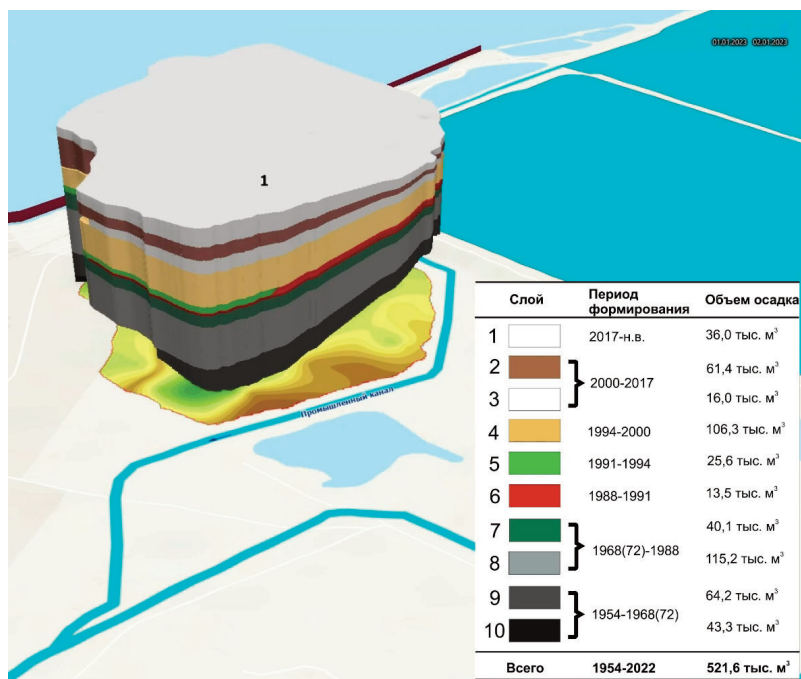


Рис. 3. 3D-модель осадка в условном масштабе и хронологическая шкала его накопления

В течение каждого этапа в пределах изучаемой территории существовали различные условия для движения и накопления природных и сточных вод, из которых происходило выпадение и формирование донного осадка, что нашло свое отражение в его вещественном составе.

Привлечение средств компьютерного моделирования позволило воспроизвести динамику накопления отхода по годам с определением его пространственного положения и объема.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-77-10062, <https://rscf.ru/project/24-77-10062/>

Литература

1. Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е. В. Геоэкологические процессы в городе и оценка их опасности // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 2022, № 3, стр. 82-96. DOI: 10.31857/S0869780922030109.
2. Belkin P., Nechaeva Y., Blinov S., Vaganov S., Perevoshchikov R., Plotnikova E.. *Sediment microbial communities of a technogenic saline-alkaline reservoir. Heliyon*, Volume 10, Issue 13, 15 July 2024, e33640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33640>.
3. Ushakova, E.; Perevoshchikova, A.; Menshikova, E.; Khayrulina, E.; Perevoshchikov, R.; Belkin, P. *Environmental Aspects of Potash Mining: A Case Study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit. Mining* 2023, 3, 176-204. <https://doi.org/10.3390/mining3020011>.

МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕГИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА МАССИВОВ ГРУНТОВ

Р.Ю. Жидков¹, Е.Р. Романова^{2,3}, Н.В. Абакумова⁴, Д.С. Савченко^{2,4},
Ф.К. Буфеев^{2,5}

¹ ГБУ «Мосгоргеотрест», 123040, г. Москва, Ленинградский пр-кт, д.11

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2

³ НИУ МГСУ, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

⁴ МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

⁵ МГРИ им. С. Орджоникидзе, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23

E-mail: abakumova.nv@mail.ru

Массивы грунтов представляют собой динамические системы, а процесс их формирования, изменения состава и состояния непрерывен. Цель этого исследования – изучение потенциала применения методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) как инструмента мониторинга процессов формирования и перемещения массивов грунтов и оценка масштабов этих процессов в пределах территории г. Москвы. В качестве исходных материалов используются данные дистанционного зондирования, используемые ГБУ «Мосгоргеотрест» для построения фотограмметрической модели, кроме того, поставлена цель оценить применимость общедоступных открытых данных для решения этой задачи.

Оценка изменений в условиях городской застройки

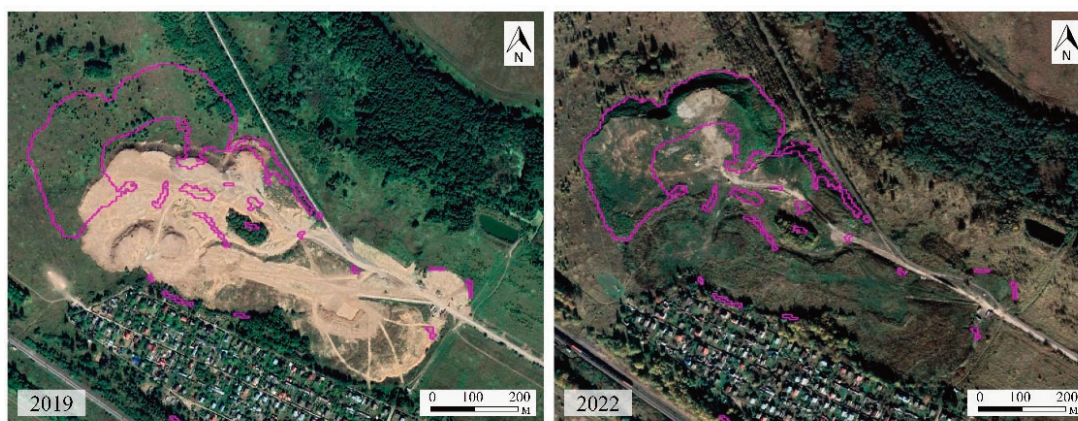
Развивая мысль академика В.И. Вернадского [1], человек уже давно стал крупнейшей геологической силой. На городских территориях хозяйственная деятельность человека – основной фактор формирования и изменения массивов грунтов. В исследовании [2] показано, что объём техногенных грунтов в границах «Старой Москвы» (т.е. без учета присоединённых к Москве в 2012 г. территорий, ранее относящихся к Московской области) составляет около 1,95 км³, а их мощность достигает 40 м, в среднем составляя порядка 2 м. В рамках настоящего исследования для изучения масштабов процесса техногенного перемещения грунтовых масс в пределах Троицкого и Новомосковского округов (Новой Москвы) использовались данные дистанционного зондирования – результаты лидарной съемки высокого разрешения, полученные за период с 2019 по 2022 гг., на основе которых были построены цифровые модели рельефа (ЦМР) в формате растра с размером элементарной ячейки 4x4 м. Имея две и более таких ЦМР, можно провести анализ изменений, произошедших в исследуемый период. Выбор временного периода в рамках этого исследования определялся фактором наличия данных – с 2023 г. использование БПЛА на территории РФ было ограничено.

Для оценки баланса грунтовых масс за указанный период была разработана методика, заключающаяся в выявлении изменений по данным ЦМР. Были выделены участки с отрицательным изменением рельефа (выемки) от 1 м и более и насыпи мощностью от 1 м. Это позволило подсчитать суммарный объем насыпи/выемки в каждом полигоне.

Поскольку результаты любого из методов ДЗЗ могут иметь неточности и «артефакты», необходима тщательная проверка результатов. С помощью сервиса Google Earth Pro по данным спутниковых снимков за исследуемый период была произведена отбраковка таких участков. Несмотря на то, что данные были предварительно обработаны, в ряде случаев за насыпи принимались построенные дома, за выемки – снесенные здания, вырубленные леса. Большое количество «артефактов» наблюдалось вблизи водных объектов.

Результаты оценки показали, что объем насыпей превышает объем выемок в 2,5 раза. Такой дисбаланс обусловлен не только разуплотнением грунтов при выемке из тоннелей и котлованов, но и привозом грунта для планомерного возведения насыпей и песчаных подушек. Также следует учитывать несанкционированное перемещение земляных масс с территории старой части Москвы и Московской области (рис. 1).

Общий прирост техногенных накоплений на территории Новой Москвы за 2019-2022 гг. составил 0,03 км³, что составляет около 1,5% от накопленных за многие столетия в границах Старой Москвы объемов.



контуры массивов техногенных грунтов мощностью более 1 м, отсыпанные с 2019 по 2022 гг.

Рис. 1. Идентифицированный по данным ДЗЗ несанкционированный отвал строительных отходов (бой кирпича и бетона) в Троицком административном округе г. Москвы

Выявление оползнеопасных участков

Среди природных факторов, определяющих перемещением масс грунтов на территории ТиНАО наиболее существенен вклад оползневых процессов. Для поиска *активных оползневых тел* предложен следующий подход. В качестве участков интереса рассматривались территории, имеющие уклон не менее 5° , практически лишённые застройки, с захватом буферной зоны 100 м. Они были выбраны при помощи данных ЕГКО (единой городской картографической основы) г. Москвы и открытых данных Open Street Map. Площадь исследуемой области составила $20,2 \text{ км}^2$. Путём попиксельного вычитания ЦМР были оцифрованы области, абсолютные отметки которых за исследуемый период изменились на $0,5 \text{ м}$ и более (рис. 3а). В результате было выделено 10103 участка накопления и 10208 участков уменьшения объема грунта.

Последующая методика исходит из представления об оползневом склоне, как области денудации (участка уменьшения абсолютных отметок), расположенной у бровки, и области аккумуляции (участка их увеличения), расположенной у подошвы. Полигоны площадью менее 1000 м^2 были отфильтрованы (рис. 3б), в результате чего выборка была сужена до 187 полигонов положительного и 269 полигонов отрицательного изменения. При дальнейшей обработке были удалены полигоны положительного и отрицательного изменения, находящиеся на расстоянии друг от друга более 100 м (рис. 3в). В результате было получено 36 полигонов потенциальной аккумуляции и 31 полигонов потенциальной денудации. Далее, с использованием ЦМР за 2019 г. были извлечены абсолютные отметки центроидов полигонов и оставлены только такие их пары, у которых абсолютные отметки полигона денудации превышают отметки полигона аккумуляции (рис. 3г). В результате были получены 13 полигонов потенциальной аккумуляции и 16 полигонов потенциальной денудации, расположенных на 11 участках. На этом этап автоматизированной обработки был завершён, а ручная проверка с использованием ЦМР показала, что единственный оползневой склон, который был активен в исследуемый период, располагается в районе п. Спортбазы (рис. 2).

В рамках исследования выполнялась оценка возможности *использования открытых данных для целей выявления активных оползневых процессов*. Была предпринята попытка охарактеризовать изменение рельефа земной поверхности на участках оползневых склонов г. Москвы с использованием общедоступных глобальных цифровых моделей местности (ЦММ) и рельефа. Обрабатывались цифровые модели: CopernicusDEM30 (2011-2015 гг.); ALOS30DEM (2006 г.); SRTM (февраль 2000 г.); FABDDDEM (ЦМР на основе ЦММ CopernicusDEM без зданий и растительности). Все эти модели имеют пространственное разрешение в средних широтах порядка 30 м [3].

В качестве источника информации об активных оползневых склонах использовалась карта современных геологических процессов и явлений в составе геологического атласа г. Москвы масштаба 1:10 000 в редакции 2012 г. [4]. В легенде к карте выделены «...глубокие оползни в юрских отложениях, которые разделены на активные и неактивные, а также показаны потенциально оползнеопасные склоны. Активность оползневых склонов на момент выпуска атласа охарактеризована по данным ОАО «Геоцентр-Москва», работам институтов геоэкологии и физики Земли РАН...» [4].

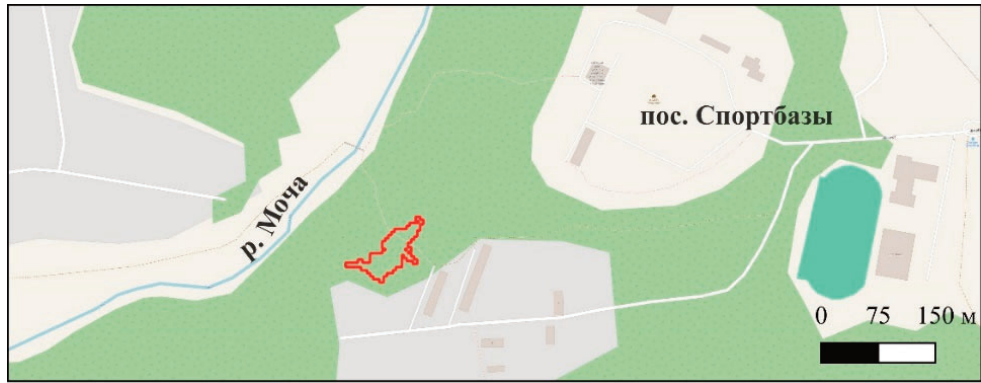
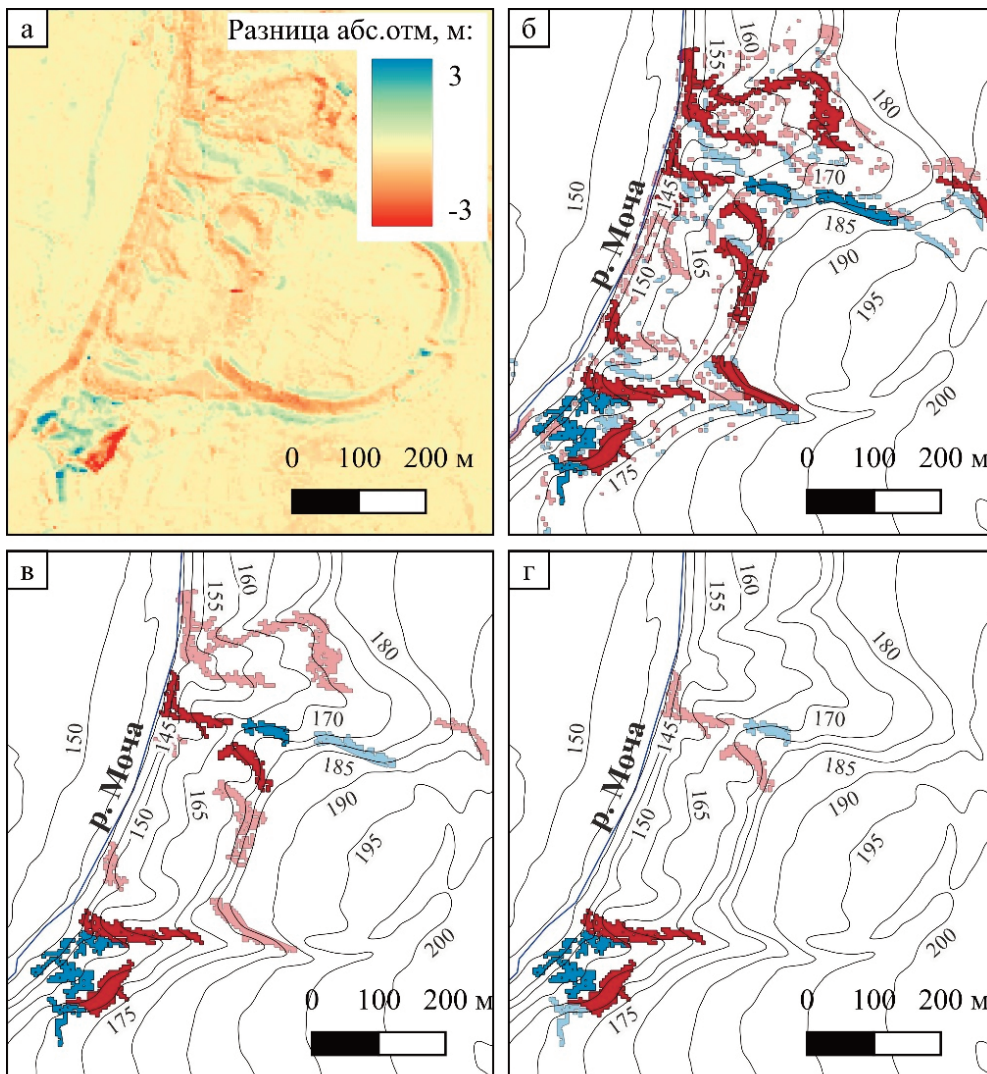


Рис. 2. Местоположение выявленного участка оползневой активности в районе пос. Спортбазы в Троицком административном округе г. Москвы



Условные обозначения

- | | |
|---|--|
| Участки прошедшие фильтрацию: | Участки не прошедшие фильтрацию: |
| ■ с увеличением абс.отм | ■ с увеличением абс.отм |
| ■ с уменьшением абс.отм | ■ с уменьшением абс.отм |
| — 200 — изолинии рельефа и значения абс. отм. по ЦМР за 2019 г. | |

Рис. 3. Методика поиска активных оползней по ЦМР: а – растр разности ЦМР за 2022 г. и 2019 г.; б – фильтрация полигонов по площади; в – фильтрация по взаимной удаленности; г – фильтрация по перепаду абсолютных отметок

Для оценки положения рельефа на начальный момент в качестве референсных моделей использовались ALOS30DEM и SRTM, поскольку они были выпущены раньше, чем Атлас, ЦММ CopernicusDEM30 и ЦМР FABDEM. Отметим, что точность глобальных моделей не позволяет применять методику, описанную ранее для территории Новой Москвы с выделением фактических областей сноса и аккумуляции, а лишь даёт возможность статистически охарактеризовать характер изменений в нижней и верхней частях оползневого склона. Из всех пар цифровых моделей ожидаемые результаты (уменьшение отметок рельефа в верхней части и увеличение в нижней) были получены при анализе моделей ALOS30DEM и FABDEM (табл. 1).

| <i>Таблица 1</i> | | | |
|---|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Статистика изменения рельефа в границах оползневых участков г. Москвы в период с 2006 по 2011-2015 гг. по результатам сопоставления глобальных цифровых моделей ALOS30DEM и FABDEM | | | |
| Наименование зоны по легенде геологического атласа | Часть склона | Площадь зоны, м² | Среднее изменение отметок, м |
| Глубокие оползни в юрских отложениях (активные) | верхняя | 286 905 | -1,1 |
| | нижняя | 300 019 | 2,5 |
| Глубокие оползни в юрских отложениях (неактивные) | верхняя | 1 289 615 | -1,6 |
| | нижняя | 1 164 178 | 0,5 |
| Склоны, потенциально опасные в оползневом отношении | верхняя | 282 808 | -1,0 |
| | нижняя | 273 352 | 0,4 |

Выявление площадных вертикальных смещений

Рассмотренные выше вопросы касались вопросов перемещения грунта (техногенного или природного). Однако, для целей *мониторинга осадок земной поверхности* точности лидарной съемки недостаточно. Большим потенциалом для выявления участков развития процессов в условиях городской застройки обладают методы спутниковой интерферометрии по данным радиолокаторов с синтезированной апертурой (РЛСА). Существует две группы интерферометрических методов – первая (InSAR) направлена на определение высот поверхности земли и создания цифровых моделей рельефа (аналогично искусственному созданию стереопар), а вторая (DInSAR) включает себя подходы к оценке изменения высот и выявлению участков проявления деформаций (дифференциальная радарная интерферометрия) [5]. В последнее время активно развиваются технологии радиолокационной съёмки, выводятся на орбиту новые космические аппараты, повышается точность и пространственное разрешение данных [6], а кроме того, появляется новое программное обеспечение [7] для анализа таких данных.

Наибольшим интересом для мониторинга смещений земной поверхности обладает разновидность дифференциальной интерферометрии – метод устойчивых отражателей. Основная идея метода заключается в том, что расчет смещений выполняется по 15 и более снимкам за разные даты, причём обрабатывается не весь снимок, а пиксели с наименьшей дисперсией амплитуды и наибольшей когерентностью радиолокационного сигнала. Основное ограничение метода заключается в том, что из расчётов невозможно получить абсолютные вертикальные и горизонтальные смещения в трёхмерном пространстве. Существует ряд подходов, позволяющих решить такую задачу, например, использование съёмок с различных точек обзора. Но наиболее достоверный способ – организация натуральных наблюдений за смещениями для установления корреляционной взаимосвязи между вертикальной и горизонтальной компонентами на исследуемой территории. Этот метод хорошо себя зарекомендовал при анализе застроенных территорий, в частности при наблюдении за осадкой крупных инженерных сооружений, линейных объектов. Кроме того, он широко применяется для мониторинга таяния ледников, выявления оползневых процессов, осадок поверхности, вызванных проходкой горных выработок, откачкой нефти и т.д.

Заключение

Тема применения данных ДЗЗ для целей мониторинга перемещения грунтов и осадки грунтовых массивов многогранна и перспективна. Показано, что результаты детальной лидарной съемки поз-

воляют выполнять оценку баланса грунтовых масс, выявлять их несанкционированное накопление, отслеживать динамику формирования техногенных массивов и осуществлять мониторинг перемещения оползневых масс. Применение открытых данных для этих целей ограничено их разнородностью, низким разрешением и отсутствием обновления. Тем не менее, можно предположить, что по мере развития технологий, комбинирование открытых ЦММ и ЦМР за разные временные периоды с другими видами дистанционных данных в совокупности с применением методов машинного обучения позволят косвенно получать информацию об активности техногенных и природных процессов. Применение интерферометрических замеров для мониторинга осадок земной поверхности – одно из наиболее перспективных направлений, которое авторы планируют развивать в дальнейшем. Одним из возможных вариантов применения может стать мониторинг за деформациями объектов культурного наследия, кровля которых покрыта материалами с высокой отражающей способностью.

Литература

1. Вернадский В.И. Несколько слов о ноосфере. *Успехи совр. биол.*, т. XVIII, вып. 2, с. 113-120. 1944.
2. Жидков Р.Ю., Абакумова Н.В., Рекун В.С. Применение комплексного ретроспективного анализа при определении конфигурации массивов техногенных грунтов на примере г. Москвы // *Инженерная геология*. — 2023. — Т. 18, № 1/2023. — сс.19-34
3. Данилов В.А., Морозова В.А., Фёдоров А.В., Шлапак П.А. Открытые данные дистанционного зондирования для выявления археологических объектов // *Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Науки о Земле*. 2024. №3. — сс.250-258
4. *Геологический атлас Москвы (в 10 томах). Масштаб 1: 10 000. Пояснительная записка*. М., ГУП «Мосгоргеотрест», 2010, 57 с.
5. Woodhouse, Iain H. *Introduction to microwave remote sensing*. CRC press, 2017, 396 с.
6. Tsokas, A., Rysz, M., Pardalos, P. M., & Dipple, K. SAR data applications in earth observation: An overview. *Expert Systems with Applications*, 205, 117342. 2022 <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2022.117342>
7. Hrysiewicz, Alexis, Xiaowen Wang, and Eoghan P. Holohan. «EZ-InSAR: An easy-to-use open-source toolbox for mapping ground surface deformation using satellite interferometric synthetic aperture radar.» *Earth Science Informatics*. 2023. №16.2 - с. 1929.

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВЕЛИЧИНЫ ПРОГНОЗНОГО ВОДОПРИТОКА В КАРЬЕР, ВЫЗВАННОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАССИВА ГРУНТОВ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Г.А. Зарницын¹, В.Н. Самарцев²

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер. 13, стр.2
E-mail: me@zarnitsyn.ru

² МГУ им. М.В. Ломоносова, 119234, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1

Введение

В связи с истощением запасов крупных приповерхностных благоприятных к освоению месторождений возникает необходимость вовлечения в эксплуатацию частично отработанных месторождений с небольшими запасами и низким содержанием сырья и с весьма сложными горно-геологическими и гидрогеологическими условиями. В настоящей работе анализируются гидрогеологические условия двух близко расположенных месторождений рудного золота, которые были отработаны в прошлом столетии и заброшены в 90-е годы. Отработка карьеров производилась комбинированным способом. К настоящему времени оба карьера и множество подземных горных выработок практически полностью затоплены, объем воды в карьерах составляет 9 и 20 млн м³. В ближайшие годы планируется возобновление эксплуатации одного из месторождений. Основной проблемой при оценке прогнозных водопритоков в карьер является неопределенность в фильтрационных и емкостных свойствах техногенно и тектонически нарушенного массива грунтов.

Характеристика объекта

Месторождения расположены в южной части восточной Сибири. Два месторождения расположены вплотную друг к другу и разделены рекой (рис. 1).

В геолого-структурном отношении рудное поле приурочено к депрессии мезозойского грабена, выполненного золотосодержащими песчаниками и конгломератами верхнеюрского-нижнемелового возраста, перекрывающими эффузивы среднего состава. В основании расположена слабопроницаемая толща метаморфических и интрузивных пород. Дополнительное осложнение вносит маломощная островная толща многолетнемерзлых пород и многочисленные разрывные тектонические нарушения. Коренные образования перекрываются чехлом рыхлых четвертичных отложений (рис. 2).

Глубина карьера №1 достигает 100 м, карьера №2 – 150 м. Спецификой обоих карьеров является высокая отработанность горного массива подземными выработками, связывающими в том числе два месторождения между собой (рис. 1). Осушение обоих месторождений велось по объединенной схеме, в связи с чем после остановки водоотлива карьеры и многочисленные подземные горные выработки начали заполняться водой и к настоящему моменту практически полностью затоплены.

Поверхность ЮВ части месторождения №1 нарушена серией крупных воронок обрушения, образовавшихся над подземными горными выработками. Общее оседание территории к настоящему моменту достигло более 5 м.

В настоящий момент неизвестно техническое состояние этих подземных горных выработок, однако часть из них точно обрушены с образованием области разуплотнения с повышенной проницаемостью, о чем свидетельствует область распространения провалов (мульд проседания), частично заполненных водой. С другой стороны, при бурении многочисленных поисково-оценочных скважин были зафиксированы провалы без керна, что свидетельствует о сохранности части выработок.

Гидрогеологическое моделирование

С точки зрения прогнозирования водопритоков в карьер интерес представляет только верхний структурный этаж, в пределах которого выделяются два гидрогеологических подразделения: водо-

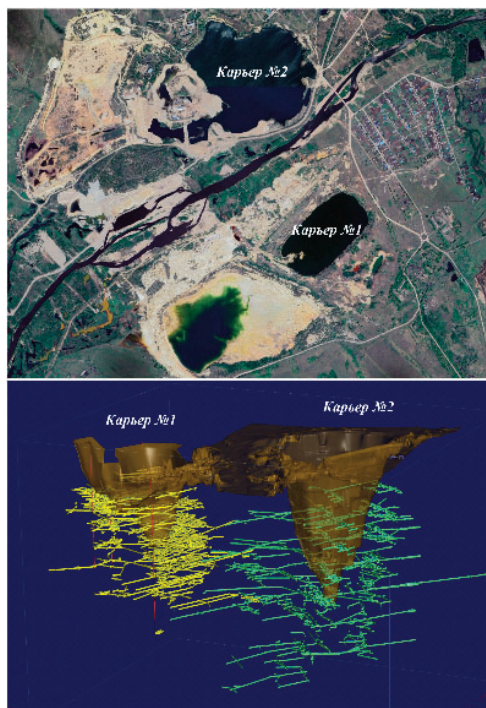


Рис. 1. Схема расположения основных изучаемых объектов на спутниковом снимке и в разрезе

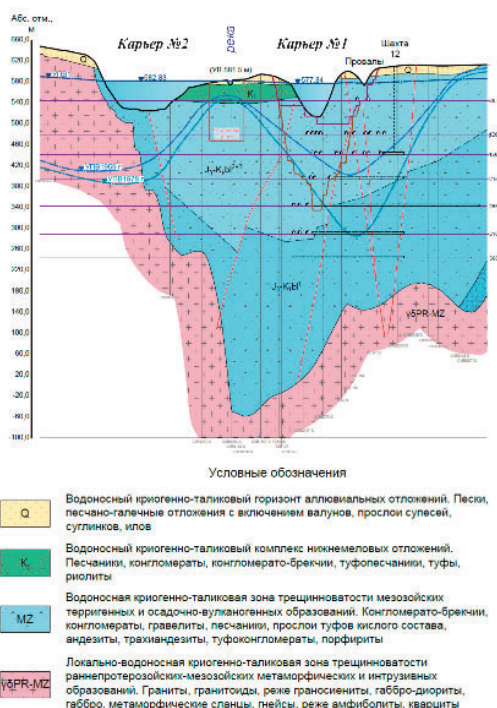


Рис. 2. Схематический геолого-гидрогеологический разрез района работ

носный комплекс рыхлых отложений четвертичного возраста и комплекс подземных вод коренных отложений юрско-мелового возраста и гранитных массивов.

Границы разрабатываемой геофильтрационной модели предварительно выбраны по водоразделам поверхностных вод. Нижняя граница обусловлена распространением проницаемых пород. В пределах межгорной впадины - подошва осадочных пород, в горном обрамлении, где на поверхность выходят граниты и диориты, их проницаемость обусловлена процессом выветривания (до глубины не более 50 м). Интерполяция рельефа и геометрии слоев со сглаживанием проводилась с использованием алгоритма «кригинг» [4].

Основными граничными условиями являются инфильтрационное питание, а также водные объекты и непосредственно карьеры, задаваемые как «дрены».

Наибольшая неопределенность заложена в фильтрационных свойствах отложений. Согласно малочисленным опытно-фильтрационным работам, коэффициент фильтрации четвертичных отложений изменяется от 3 до 62 м/сут, для осадочных отложений – от 0,01 до 8,56 м/сут. Можно предположить, что k порядка единиц м/сут обусловлен зоной повышенной трещиноватости вблизи разломов и выработок, тогда как средние значения массива $k = 0,04$ м/сут. На этом фоне важным является учет затопленных выработок. За более чем 25 лет выработки, скорее всего, частично или полностью обрушились, заполнились рыхлым материалом и образовали каналы повышенной проницаемости. Учитывая плотность и количество выработок, представляется нецелесообразным учитывать каждую в отдельности, и выделен общий контур зоны повышенной проницаемости. Предполагается, что в этой зоне коэффициент фильтрации повышен на порядок относительно вмещающих пород – до 0,5 м/сут и выше.

Численная модель была разработана для программы Modflow версии 6. В разрезе четвертичным отложениям соответствует один, самый верхний расчетный слой. Водоносный комплекс разделен на 20 расчетных слоев для более корректного расчета как восстановления уровней после остановки водоотлива, так прогноза снижения уровней после начала осушения карьера.

Начальные значения фильтрационных параметров перечислены выше. Одним из важнейших параметров, оставшихся без обоснования, является гравитационная емкость (водоотдача) пород. От нее зависит общий объем воды, который необходимо откачать для осушения карьера, и если объем самого карьера хорошо известен, то объем воды в породе может варьироваться в широких пределах. Величина гравитационной емкости коренных пород была откалибрована по замерам восстановления уровней в карьере №1 после завершения отработки месторождений и составила 1,2%

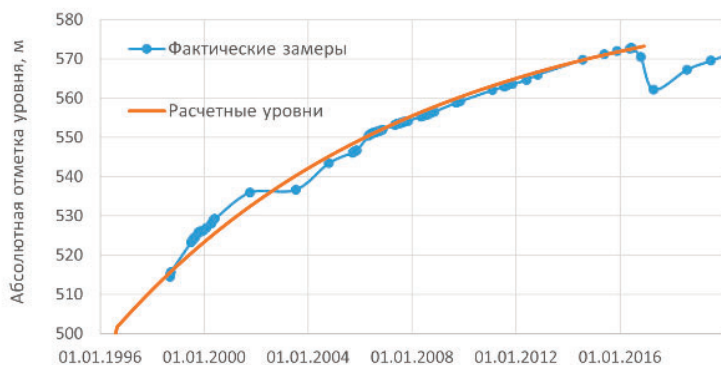


Рис. 3. Расчетный и фактический графики восстановления уровней в карьере №1

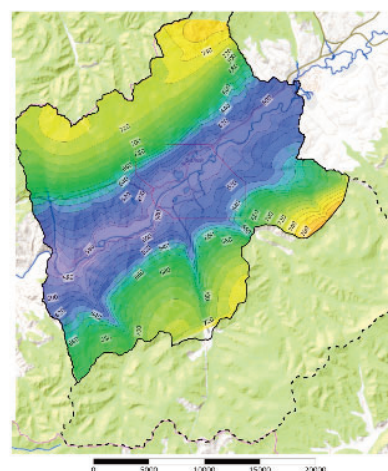


Рис. 4. Расчетный уровень подземных вод

(рис. 3). Водоотдача рыхлых четвертичных отложений не калибровалась и задана равной 10%. Расчетный естественный уровень подземных вод, полученный в результате калибровки показан на рис. 4. Провал на графике в 2016-2017 гг (рис. 3) связан с проведением опытной откачки 4 млн м³ воды из карьера №1.

На откалиброванной модели в первую очередь решалась прогнозная задача оценки объема водопритоков в карьер №1 в процессе его осушения в течение года, а после этого – в процессе его отработки в течение 7 лет.

Анализ неопределенности величины прогнозного водопритока

Принятые значения геофильтрационных параметров не являются строго определенными. В ходе калибровки был воспроизведен фактически известный ход восстановления уровней воды в карьере №1. Сравнительно небольшое количество наблюдений за состоянием подземных вод позволяет подтвердить только средние значения геофильтрационных параметров.

Коэффициент фильтрации осадочных пород принят равным 0,04 м/сут, однако возможный диапазон его изменчивости ожидается не меньше, чем для более изученных рыхлых пород. Дополнительно, массив грунтов имеет два типа нарушений – разрывные тектонические нарушения и подземные горные выработки. Согласно анализу архивных испытаний, для большинства параметров диапазон изменчивости достигает двух порядков. Как было описано ранее, в модель не задавалась каждая выработка отдельно, поскольку нет информации об их современном состоянии. В случае обрушения выработки не только сама выработка заполняется рыхлым материалом, но и массив над выработкой разрушается и его проницаемость существенно повышается. Тот факт, что k_f в нарушенной зоне повышен не вызывает сомнений, но повышение именно на порядок является допущением.

В ходе разведки месторождений было выявлено около 60 отдельных разрывных нарушений. Вдоль каждого разлома существует зона повышенной трещиноватости, реализуемая на модели с $k_f = 0,5$ м/сут в зоне шириной 25 м.

В этих условиях, при недостаточной обоснованности геофильтрационных параметров, обязательно необходимо оценить неопределенность прогноза. Одним из способов оценки неопределенности для подобных нелинейных задач является метод Монте-Карло [1]. Применительно к геофильтрационным моделям метод Монте-Карло заключается в оценке распределения вероятности прогнозируемой величины путем многократного запуска модели с различными наборами фильтрационных параметров. Таким образом возможно связать неопределенность прогноза с неопределенностью исходных параметров. Неопределенность прогноза оценивается относительно четырех параметров:

1. Гравитационная водоотдача – 1,2 % (интервал от 0,6 до 2,4% - в 2 раза).
2. K_f ненарушенного массива – 0,04 м/сут (от 0,01 до 0,16 м/сут – в 4 раза).
3. K_f приразломных зон – 0,5 м/сут (0,1 – 2,5 м/сут – в 5 раз).
4. K_f в зоне подземных выработок – 0,5 м/сут (0,1 – 5 м/сут).

Для указанных четырех параметров с помощью языка R [www.R-project.org] составлены псевдослучайные выборки в границах принятых диапазонов. Для водоотдачи выбрано нормальное распределение, для коэффициентов фильтрации - логнормальное, как более подходящее [2, 3, 5]. Распределения параметров показаны на рис. 5. Всего составлено 500 псевдослучайных наборов из перечисленных четырех параметров, для каждого из которых рассчитано осушение карьера №1 в течение одного года.

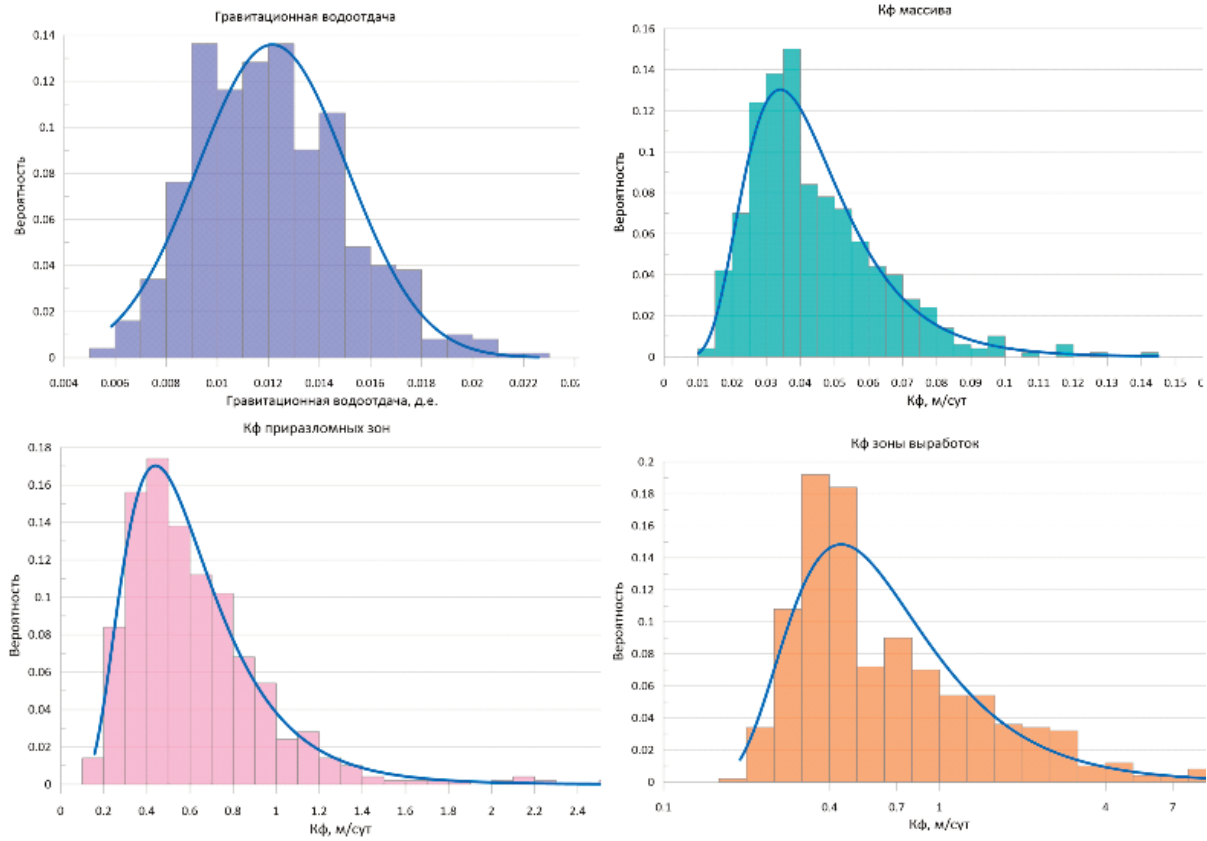


Рис. 5. Принятая плотность распределения четырех параметров

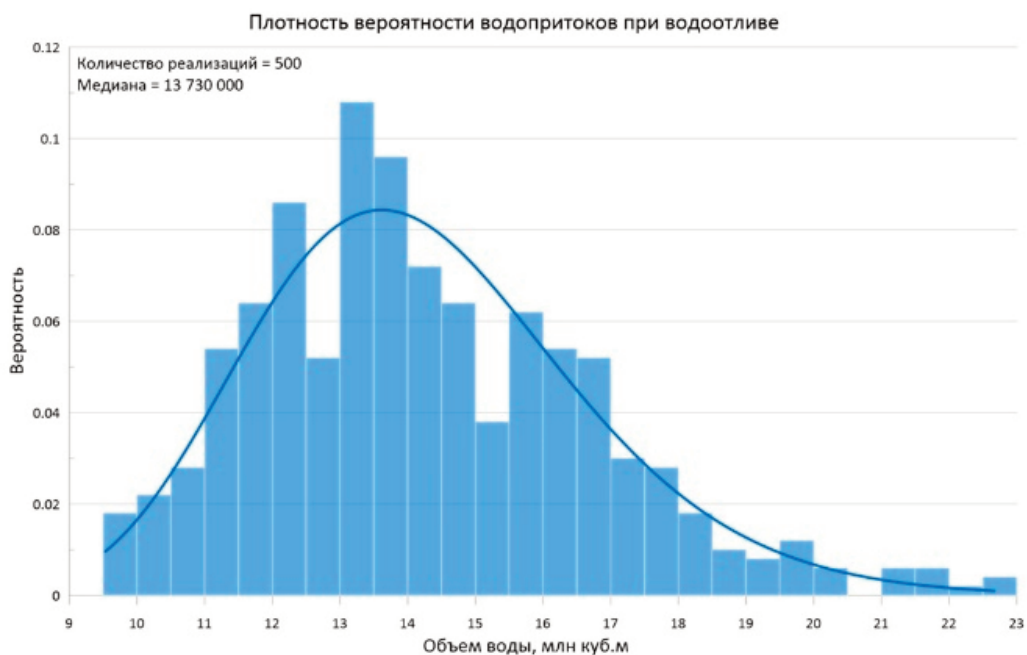


Рис. 6. Гистограмма плотности вероятности прогнозного объема воды

Результаты геофильтрационных прогнозных расчетов

Полученный диапазон вероятного объема воды, который необходимо откачать для первичного осушения карьера №1, в целом повторяет предварительные результаты, полученные на более грубой региональной модели. Распределение вероятностей полученного прогнозного объема воды, который необходимо откачать для первичного осушения карьера №1, имеет логнормальный характер с медианой 13,7 млн м³, как показано на рис. 6. Из рисунка видно, что распределение является не вполне симметричным. Минимальный прогнозируемый водоприток составляет 9,75 млн м³, отсутствует характерный для псевдослучайных распределений «хвост» маловероятных значений. Это обусловлено тем, что существенная часть воды (~ 9 млн м³) содержится в свободном виде в самом карьере, и расчетный объем откачиваемой воды не может быть ниже этой величины.

Дополнительные расчеты

На сформированной локальной модели также выполнен прогноз водопритоков в период углубления карьера в первые 7 лет его разработки после первого года осушения, всего 8 лет. Подробное описание результатов опущено ввиду ограниченного объема настоящей работы. Скажем только, что среднесуточные водопритоки увеличиваются от 8,5 до 16 тыс м³.

В рамках прогнозных расчетов также был количественно оценен потенциальный аварийный прорыв подземных горных выработок, соединяющих карьеры. В ходе решения нескольких нестационарных сценариев был получен дополнительный водоприток в диапазоне от 24 до 75 тыс м³/сут в случае аварии. Наконец, на основе геофильтрационной модели выполнена прогнозная оценка изменения минерализации и водородного показателя в процессе отработки карьера.

Литература

1. Doherty JE, 2015: *Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models*. Watermark Numerical Computing, ISBN: 978-0-9943786-0-6, Brisbane
2. Freeze A., 1975: *A Stochastic-Conceptual Analysis of One-Dimensional Groundwater Flow in Nonuniform Homogeneous Media*. *Water Resources Research*, 11(5), pp. 725-741. doi: 10.1029/WR011i005P00725
3. Gelhar, L.W.; Welty, C.; Rehfeldt, K.R., 1992: *A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers*, *Water Resour. Res.*, 28(7), pp. 1955-1974.
4. Kleijnen, Jack., 2017: *Kriging: Methods and Applications*, SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.3075151.
5. Sudicky, E.A., 1986: *A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer: Spatial variability of hydraulic conductivity and its role in the dispersion process*. *Water Resources Research*, 22, pp. 2069-2082. doi:10.1029/WR022i013p02069

КЛАССИФИКАЦИЯ МАССИВОВ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ И ОЦЕНКИ ИХ ПОВЕДЕНИЯ

О.В. Зеркаль¹, И.К. Фоменко², Ю.В. Фролова¹

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1

E-mail: igzov@mail.ru, ju_frolova@mail.ru

² РГГУ им. Серго Орджоникидзе, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23

E-mail: ifolga@gmail.com

Введение

В инженерной геологии во многих случаях при решении практических задач (при инженерно-строительной деятельности, в т.ч. гидротехническом строительстве, при освоении месторождений, при реализации мероприятий инженерной защиты и др.) требуется изучение и оценка горных пород в естественных условиях их залегания, для которого характерно непостоянство строения, состава и состояния, наличие различного рода неоднородностей (выветрелости, трещиноватости, сланцеватости и т.д.), а также анизотропность физико-механических свойств. При этом традиционный подход к изучению грунтов – разностороннее исследование отобранных образцов, очевидно, не обеспечивает полноты оценки состояния и характеристик массивов горных пород. Для решения этой проблемы в середине XX в. в инженерной геологии вводятся понятия «массив горных пород» и «грунтовая толща» (для территорий с преимущественным распространением нелитифицированных горных пород). В представляемой работе рассматриваются массивы скальных горных пород.

Понятие «массив горных пород»/«массив скальных грунтов»

В настоящее время существует два подхода к выделению «массивов горных пород» (или «массивов скальных грунтов») как объектов изучения. Сторонниками первого подхода (Г.А. Голодковская, И.С. Комаров, М. Матула, Л.В. Шаумян и др.), не увязывающими это понятие напрямую с хозяйственной деятельностью, под «массивами горных пород» понимаются «структурно обособленные участки земной коры, характеризующиеся определенными особенностями тектонического, геологического строения, состояния и физико-механических свойств пород» (с. 127, Голодковская и др., 1975). И.С. Комаров уточнил, что для массивов горных пород присущи не только особенности строения и состава, но также характерно наличие дислокаций, подземных вод, физических полей и происходящих геологических процессов (Комаров, 1981). При этом массивы горных пород рассматриваются как «сложно построенные геологические среды, расчлененные поверхностями раздела на структурные (объемные и плоские) элементы различных масштабных уровней и порядков» (с. 84, Голодковская и др., 1998).

Представители второго подхода (П.Н. Панюков, М.В. Рац, Л. Мюллер и др.) увязывают понятие «массива горных пород» исключительно со сферой взаимодействия литосферы с инженерными сооружениями. В рамках этих воззрений «массив горных пород» определяется как «часть земной коры, находящейся в сфере инженерного воздействия, исследуемая с целью определения условий производства инженерных работ и эксплуатации сооружений и обладающая инженерно-геологической структурой, отличной от структуры соседних с ним участков земной коры» (с. 130, Панюков, 1962). Следует отметить, что в действующем ГОСТ 25100-2020 понятие «массива грунтов» также увязывается с объемом грунтов в основании здания/сооружения или вмещающего его.

Вместе с тем, авторы настоящей работ являются сторонниками первого подхода, считая, что ограничение изучаемой части литосферы исключительно «сферой инженерного воздействия» не позволяет в полной мере и с необходимой полнотой оценить массив горных пород, особенности его структуры, строения и другие значимые характеристики, которые могут существенно превосходить (в объеме) «сферу инженерного воздействия». Особенно это факт является наглядным при оценках устойчивости «скальных» склонов, не испытывающих прямого техногенного воздействия, но их деформации, смещения могут представлять опасность для объектов хозяйственной деятельности.

На сегодняшний день в международной практике в нормативных документах «массив горных пород» рассматривается как состоящий из ненарушенного материала вместе с разрывами и зо-

нами выветривания (ISO 14689:2017), пустотами с жидким или газообразным заполнением, часто с анизотропными свойствами (ÖGG, 2023)¹. В отечественных нормативных документах, регламентирующих инженерные изыскания (ГОСТы, СП, Методические указания (для разработки МПИ) и др.), детализация понятия «массив горных пород»/«массив скальных грунтов» не дается.

Системы классификации скального массива

Учитывая сложности изучения и оценки массивов горных пород, в инженерной геологии и в других смежных дисциплинах на протяжении десятилетий разрабатывалось (и продолжает разрабатываться) множество систем классификации скальных массивов, часто на основе эмпирических или вычисленных показателей, которые призваны помочь в общей характеристике состояния массива скальных грунтов. Сегодня существуют десятки систем классификации скальных массивов, что является признаком нерешенности вопросов описания этого природного объекта. Продолжающиеся дебаты среди инженер-геологов, геотехников, горных инженеров показывают, что научное сообщество еще не нашло оптимального решения этой проблемы.

Самая ранняя система классификации массивов горных пород была представлена Г. Агриколой (1556), различавшего 4 типа массивов. Современный этап изучения и оценки классификации скальных массивов большинством специалистов во всем мире отсчитывается с работ М.М. Протодяконова, предложившего показатель крепости горных пород f^2 и разработавшего на его основе соответствующую шкалу (Протодяконов, 1911, 1926).

В 40^е-50^е г.г. XX в. выходят работы К. Терцаги (1946), И. Штини (1950), Л. Рабцевича (1957), Х. Лауффера (1958) и др., рассматривавшие вопросы поведения скальных массивов при проходке тоннелей. Важным шагом в оценке массивов скальных горных пород стал предложенный Д. Диром показатель качества породы - RQD (Rock Quality Designation), характеризующий (в %) отношение общей длины сохранных кусков керна длиной более 10 см к общей длине пробуренного интервала в скважине (Deere, 1963). Индекс RQD в настоящее время активно применяется как для самостоятельной классификации скальных грунтов при бурении (см. ГОСТ 25100-2020), так и в составе рейтинговых классификаций массивов грунтов.

В 70^е-80^е г.г. XX в. разрабатываются три наиболее широко используемых в настоящее время системы классификации массивов скальных грунтов, основанные на результатах обобщений эмпирических данных:

- классификация (рейтинг горных пород - RMR), предложенная в 1973 г. З.Т. Беньявским (Bieniawski, 1973);
- Q-классификация, разработанная Н. Бартоном с соавторами в 1974 г. (Barton et al., 1974);
- классификация по критерию прочности Хоэка-Брауна, предложенная в 1980 г. Э. Хоэком и Э.Т. Брауном (Hoek, Brown, 1980).

Геомеханическая классификация Беньявского (RMR), по мере поступления новых данных, полученных в ходе исследований, модифицировалась. Одна из последних версий RMR была принята в 1989 г. (Bieniawski, 1989). В классификации RMR используются 6 параметров: J_{A1} - прочность пород на одноосное сжатие; J_{A2} - показатель качества пород RQD; J_{A3} - расстояние между трещинами; J_{A4} - характер трещиноватости (наличие заполнителя, шероховатость поверхностей трещин); J_{A5} - обводненность трещин; J_B - ориентировка трещин (относительно проходки выработок). Сумма рейтинговых значений этих показателей в совокупности дают общий рейтинг массива:

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B$$

Значения рейтинга варьируются от 8 до 100. При этом, горные породы делятся на 5 классов по устойчивости. В настоящее время предложена целая серия модификаций RMR-классификации Беньявского для различных целей и условий (горного дела (проектирования карьеров), например,

¹ ГОСТ Р ИСО 14689-1-2017 Исследования и испытания геотехнические. Идентификация и классификация скальных грунтов. ч. 1. Идентификация и описание (ISO 14689-1:2003, IDT) содержит следующее определение: «3.2 скальный массив (rock mass): Естественное геологическое образование из совокупности блоков одной или нескольких горных пород, включая все нарушения и изменения структуры и целостности (трещиноватости и профиля выветривания).»

² В настоящее время принимается, что $f \approx 0,1 \sigma_{сж}$, где $\sigma_{сж}$ - предел прочности на одноосное сжатие (МПа).

Д. Лобширом (MRMR – Mining Rock Mass Rating), оценки устойчивости массивов «скальных» склонов, например, М. Романа (SMR - Slope Mass Rating) и др.).

Q-классификация Н. Бартона также основывается на учете шести параметров. Численное значение индекса Q определяется по формуле:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_v}{SFR}$$

где RQD - показатель качества породы; J_n - количество систем трещин; J_r - показатель шероховатости трещин; J_a - показатель изменения числа трещин; J_v – показатель обводненности трещин; SFR – коэффициент, учитывающий природное напряженное состояние массива.

Численное значение индекса Q варьирует от 0,001 до 1000 по логарифмической шкале.

Классификации З.Т. Бенявского и Н. Бартона основаны на рейтинговых оценках и учитывают информацию о прочности нетронутого породного массива, о числе и характеристиках поверхностей трещин и их плотности, а также влияние подземных вод, действующих в массиве природных напряжений, пространственное расположение и простирание основных систем трещин. Вместе с тем, учитываемые показатели имеют несколько различный вес в каждой из рассматриваемых классификационных систем. Этот факт отмечается многими специалистами, которые предпринимали попытки получения корреляционных зависимостей значений показателя RMR и индекса Q.

В 1980 г. для классификации массивов скальных пород Э. Хоеком и Э.Т. Брауном был предложен нелинейный критерий прочности, в первоначальной форме имевший вид (Хоек, Brown, 1980):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1},$$

где σ_1 и σ_3 - главные напряжения, σ_c – прочность на одноосное сжатие, m – эмпирический параметр для горных пород.

Критерий Хоека-Брауна развивался, опираясь на результаты обобщений эмпирических данных, в течение более чем двух десятилетий. Последняя версия (в ред. 2018) рассматриваемого критерия известна под названием «Обобщенного критерия Хоека-Брауна» (Generalised Hoek-Brown criterion) (Хоек, Brown, 2019). Согласно обобщенного критерия Хоека-Брауна, для расчета прочности требуется четыре начальных параметра:

σ_{ci} – прочность на одноосное сжатие;

m_i – литологический тип грунтов;

GSI – индекс геологической прочности, зависящий от структуры массива, например, ненарушенный, блочный, флишевый и т.д. (от 0 до 100);

D – фактор нарушенности массива горных пород (от 0 до 1).

Каждый из описанных выше четырех входных параметров (σ_{ci} , m_i , GSI , D) может быть оценен на основе классификационных графиков и таблиц Хоека-Брауна в зависимости от конкретных геологических условий. Обобщенный критерий Хоека-Брауна (в ред. 2018) может быть определен следующим образом (Хоек, Brown, 2019):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a,$$

где σ'_1 и σ'_3 – эффективные главные напряжения, σ_{ci} – прочность на одноосное сжатие, m_b , s и a – параметры Хоека-Брауна для пород, которые можно получить из следующих уравнений:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

$$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$$

Индекс геологической прочности (GSI), введенный в 1992 г., в свою очередь, наиболее эффективным методом оценивается с использованием уравнения (Методические указания..., 2022):

$$GSI = 1,5 J_{Cond}^{89} + \frac{RQD}{2}$$

Как видно из приведенной формулы индекс геологической прочности (GSI) определяется через показатель состояния поверхности трещин (J_{Cond}^{89}), наследуемый из рейтинговой классификации Бенявского (RMR), и показатель качества керна (RQD).

Направления применения систем классификации скальных массивов

В настоящее время в инженерно-геологической практике как вышеописанные классификации массивов скальных грунтов (наиболее часто), их модификации, а также другие подходы (например, A-BQ в Китае) активно используются при выполнении работ на территориях с широким распространением скальных горных пород, а также в рамках изысканий при проектировании подземных или заглубленных объектов в других регионах (например, в последние годы – на территории Москвы). Этому способствует разработанные методы (эмпирические формулы) перехода от рейтинговых показателей к традиционно используемым показателям свойств грунтов (например, модулю общей деформации массива скальных грунтов).

Другим важным направлением применения классификаций массивов скальных грунтов являются работы по оценке устойчивости «скальных» склонов. Для решения этого круга задач разработаны методы оценки прочностных показателей скальных грунтов как с использованием индекса геологической прочности (GSI), предложенного Э. Хоеком, так и на основе применения критериев прочности Бартона-Бандиса (в составе Q-slope (Bar, Barton, 2024)). Пример реализации этого подхода приведен в (Зеркаль, Фоменко, 2016).

Выводы

Решение практических задач в инженерной геологии на основе систем классификации скальных массивов может способствовать более близкому приближению получаемых результатов к реальным условиям скального массива, а также может способствовать лучшему пониманию существующих геологических неопределенностей. Вместе с тем, при применении этого подхода следует четко понимать то, что разработанные классификации массивов грунтов основаны на эмпирических данных и могут давать существенный разброс результатов в зависимости от природных условий.

Литература

1. Голодковская Г.А., Демидюк Л.М., Шаумян Л.В. Состав и содержание инженерно-геологических карт при разведке и проектировании месторождений полезных ископаемых. Проблемы инженерно-геологического картирования (Тр. Всесоюз. симп.). М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, с. 119-135
2. Голодковская Г.А., Шаумян Л.В. Инженерно-геологическая типизация массивов горных пород//Изв. Вышш. уч. завед. Геология и разведка. 1998. №6. с. 84-91
3. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оползни в скальных грунтах и оценка их устойчивости//Инженерная геология. 2016. №4. с. 4-21
4. Комаров И.С. Системный подход к инженерно-геологическому изучению территорий городских агломераций//Методы типизации и картирования геологической среды городских агломераций для решения задач планирования инженерно-хозяйственной деятельности. М.: МосЦТИСИЗ, 1981, с. 87-94
5. Методические указания по изучению массива горных пород для обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. М., ИПКОН РАН, 2022, 102 с.
6. Панюков П.Н. Инженерная геология. М., Госгортехиздат, 1962, 343 с.
7. Протодьяконов М.М. Материалы для урочного положения горных работ Ч. 1. Горные работы. Изд-во ЦК горнорабочих СССР, 1926, 282 с.
8. Протодьяконов М.М. О крепости горных пород с точки зрения горного искусства//Горнозаводское дело. 1911. №52
9. Bar N., Barton N. Q Slope: Rock Slope Engineering 10 Years on//Rock Mechanics and Rock Engineering. 2024

10. Barton N., Lien R., Lunde J. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support//Rock Mechanics*. 1974. 6. pp. 189-236
11. Bieniawski Z.T. *Engineering classification of jointed rock masses. Civil Engineer in South Africa*. 1973. 15(12). pp. 335-343
12. Bieniawski Z.T. *Engineering rock mass classifications*. New York, Wiley, 1989, 251 p.
13. Deere D.U. *Technical description of rock cores for engineering purposes//Rock Mechanics and Engineering Geology*. 1963. 1(1). pp. 16-22
14. Hoek E., Brown E.T. *Empirical Strength Criterion for Rock Masses. Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1980. 106(9). pp. 1013-1035
15. Hoek E., Brown E.T. *The Hoek-Brown failure criterion and GSI - 2018 edition//Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11, pp. 445-463
16. Hoek E., Wood D., Shah S. *A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. Proc. rock characterization. Symp. Int. Soc. Rock Mech. (Eurock'92)*. pp. 209-213
17. ISO 14689:2017 (E) *Geotechnical investigation and testing - Identification, description and classification of rock*. 2018, 22 p.
18. ÖGG *Richtlinie Geotechnische Planung von Untertagebauten Zyklischer und kontinuierlicher Vortrieb: Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung*, 2023

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ РЕЖИМ КРУПНОЙ ТРЕЩИНЫ НА ИЗВЕСТНЯКОВОМ ПЛАТО ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА

Ш.Г. Идармачев

Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН
367030, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д. 75
E-mail: as2106@mail.ru

Известно, что обвалы могут быть вызваны рядом механизмов, многие из которых происходят в периоды, когда вероятные причины, такие как осадки, сейсмическая активность и замерзание, отсутствуют. Было высказано предположение, что эти загадочные обвалы могут происходить из-за нагрева поверхности скальных пород солнечной энергией. В природе известны случаи отслаивания слоев горных пород под воздействием температурного режима, например, скальные купола с их слоями отслаивающихся пластов, напоминающими собой луковую шелуху, являются одними из самых завораживающих форм рельефа на Земле. Долгое время считалось, что отслаивание является неотъемлемой частью формирования куполов, но точный механизм отслаивания остаётся загадкой, в основном из-за отсутствия прямых наблюдений за природными явлениями. Наибольшую опасность представляют скальные массивы готовые к обрушению с вертикальным расположением трещин. В частности, нами в районе Верхнего Гуниба (Республика Дагестан) был исследован массив объемом 350 м³, отделенный от материнской части вертикальными трещинами отрыва, достигающими в отдельных местах до 12 см (рис. 1). Ранее в этом же районе проводилось исследование другого крупного потенциально опасного массива шириной трещины до 2-х метров различными методами мониторинга: сейсмическими, наклонметрическими и деформометрическими [1-3], что дало возможность приобретения определенного опыта проведения работ, имеющих значений не только научного исследования в области изучения ландшафтных процессов, но и практического использования, полученных результатов для обеспечения безопасности населенного пункта Гуниб, расположенного на горном склоне.



Рис. 1. Фото неустойчивого массива с вертикальными отрывными трещинами

Исследуемый в настоящее время массив отличается от предыдущих, тем, что вертикальные трещины расположены близко к поверхности и тем самым сильно нагреваются от солнечной энергии, так как открытые трещины не позволяют рассеивать тепловую энергию по всему массиву, а способствуют ее накоплению в верхнем слое, обращенном к солнцу. Для эксперимента в трещине был установлен электронный датчик линейного перемещения китайского производства марки KTR с

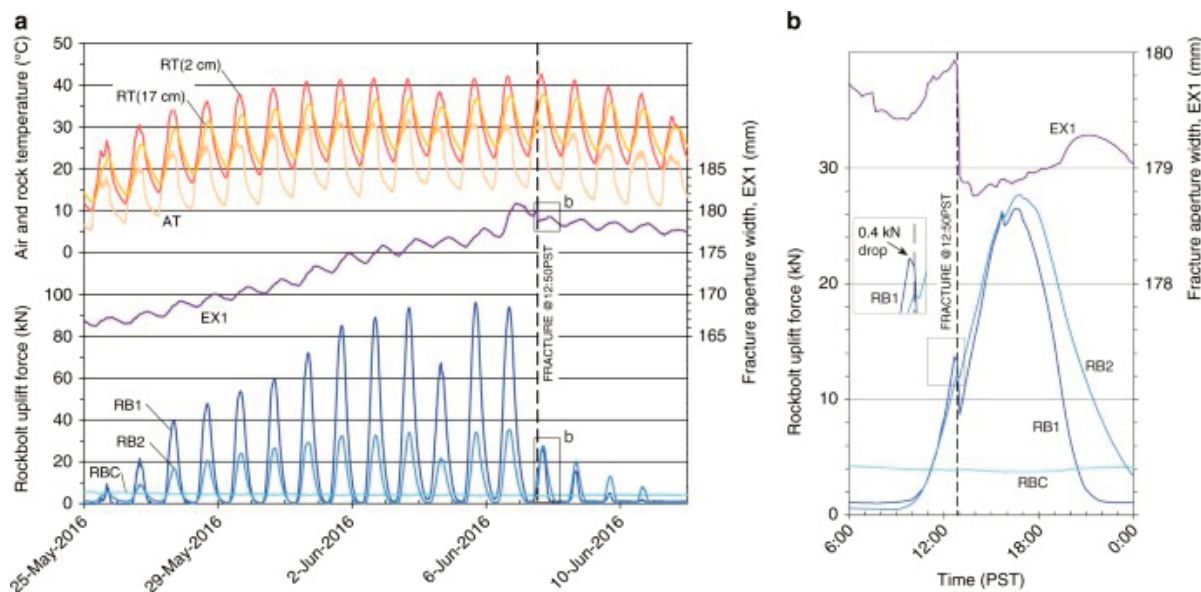


Рис. 2. а - графики температуры атмосферы и пород, ширины трещины, напряжения анкерных болтов в разных точках; б - развернутые графики ширины трещины, напряжения анкерных болтов во время разрушения пород

погрешностью ± 10 мкм. Измерения осуществлялись непрерывном режиме с сохранением данных на компьютере. По этим данным строились графики, которые затем сравнивались с температурой атмосферы. Сравнение их показало, что суточный ход ширины трещины тесно связан с термическими напряжениями в скальном массиве, вызванными солнечной радиацией и температурой атмосферы. При максимальной интенсивности солнечной радиации в 13 часов по московскому времени ширина трещины увеличивается на 850 мкм.

В литературе [4] приводятся данные, указывающие, что термические напряжения могут играть ключевую роль в инициировании отслаивания верхних слоев пород, следовательно, могут быть важным фактором, влияющим на формирование куполов. Поверхностное отслаивание, субпараллельное растрескивание горных пород и образующиеся в результате этого различные формы рельефа привлекают внимание учёных уже более ста лет [5, 6]. Отслаивание обычно связывают с несколькими механизмами, в том числе с удалением покрывающих пород и упругим восстановлением [4, 7], тектоническим сжатием [5, 8] и топографической кривизной при сжатии, параллельном поверхности [6, 9]. Известен феномен взрывного отслаивания пород [4]. В августе 2014 года, в самые жаркие дни лета, гранитный купол в Калифорнии, США, самопроизвольно отслоился; свидетели наблюдали обширные трещины, в том числе отслоившийся пласт весом около 8000 кг, взлетевший в воздух. Взрыву предшествовали звуковые колебания и образование трещин в сантиметровом масштабе. Разрушения происходили до того, как в нескольких случаях наблюдалось поднятие пластов. Такие наблюдения хорошо задокументированы в литературе по добыче полезных ископаемых открытым и подземным способами [10, 11], но в целом могут быть связаны с изменениями напряжения, вызванными самой добычей полезных ископаемых. Учитывая, что на куполе Твен-Харт таких внезапных изменений напряжения не происходило, эти предшествующие сигналы примечательны тем, что дают некоторое представление о неизбежном разрушении. Во второй половине событий 6 сентября 2014 г. и в двух событиях 2016 года, когда толщина листов была относительно небольшой (~ 10 см), за несколько минут до взрывного разрушения раздавались слышимые потрескивания, что позволило людям покинуть купол. Эта последовательность указывает на переход от субкритического к критическому распространению трещин внутри купола. Во всех случаях разрушения возникали только летом и им предшествовали 10-дневные периоды с самыми высокими температурами за всю историю наблюдений в этом районе.

Последующие эпизоды отслаивания в течение следующих двух летних сезонов были зафиксированы с помощью приборов, которые впервые зафиксировали деформацию отслаивания и условия напряжения. На рис. 2 приведены результаты наблюдений 3,5-летнего полевого мониторинга отслаивающегося гранитного утёса в Национальном парке Йосемити [4].

Когда максимальные температуры выравниваются в начале июня, силы поднятия и деформации продолжают увеличиваться вплоть до энергичного разрушения (пунктирная линия). Максимальные напряжения силы поднятия составили 38–98 кН. Разрушение сопровождалось мгновенным оседанием верхнего листа на 1 мм и падением силы на 5 кН при погрешности измерений прибора $2\sigma = 0,8$ кН. Общая деформация пласта на северной стороне купола (EX1) увеличивалась одновременно с сигналами от скальных пород, при этом совокупное поднятие составило 14 мм. Эти сигналы тесно связаны с температурой воздуха и горных пород. Исследования [12] показывают, что кумулятивный рост трещин может происходить в типичных современных метеорологических условиях во многих местах.



Рис. 3. Вид отслоенных пород концентрической формы на склоне скального массива на территории Верхнего Гуниба

Подобного рода отслаивание пластов было обнаружено в районе купольного массива на территории Верхнем Гунибе, состоящая из известняков (рис. 3). По нему ширина трещин по всему периметру составляет 10–12 мм, мощность отслоившегося пласта равна 1,0–1,2 м. Площадь кольцевой структуры составляет 70 м². Механизмами отслоения пласта и его разрушения являются не только пиковые летние и суточные изменения температуры верхнего слоя пород, сезонные процессы заморозания и таяния снега, но и тектонические напряжения сжатия, близкие к пределу прочности пород. Визуальное обследование данной кольцевой структуры позволяет предположить, что оно произошло взрывным выбросом пород. В пользу такого механизма указывает отсутствие внутри крупных обломков, все они расположены в нижней части кольцевой структуры.

Выводы

Обвалы и разрушения пород могут быть вызваны не только осадками, сейсмической активностью, образованием льда в трещинах, но и из-за нагрева поверхности скальных пород солнечной энергией. В природе известны случаи отслаивания слоев горных пород под воздействием температурного режима, например, скальные купола с их слоями отслаивающихся пластов. Точный механизм отслаивания остаётся загадкой, в основном из-за отсутствия прямых наблюдений за природными явлениями. Наибольшую опасность представляют скальные массивы готовые к обрушению с вертикальным расположением трещин. В частности, нами в районе Верхнего Гуниба (Республика Дагестан) был исследован массив объемом 350 м³, отделенный от материнской части вертикальными трещинами отрыва, достигающими в отдельных местах до 12 см. Для проведения эксперимента в трещине был установлен электронный датчик линейного перемещения китайского производства марки KTR с погрешностью ± 10 мкм. Измерения осуществлялись непрерывном режиме с сохранением данных на компьютере. По данным строились графики, которые затем сравнивались с температурой атмосферы. Сравнение данных показало, что суточный ход ширины тре-

щины, связан с термическими напряжениями в скальном массиве, вызванными солнечной радиацией и температурой атмосферы. При максимальной интенсивности солнечной радиации в 13 часов по московскому времени ширина трещины увеличивается на 850 мкм. Численные оценки значения теплового расширения пласта на скальном массиве Верхний Гуниб согласуются с данными полевых наблюдений.

Работа выполнена по госзаданию (FMSW-2022-0026) Института геологии ДФИЦ РАН

Литература

1. Идармачев Ш.Г., Джамалудинов А.М., Идармачев И.Ш. Результаты наклонометрических наблюдений на опасном скальном массиве над населенным пунктом Гуниб на Северном Кавказе // *Тр. Ин-та геологии Дагестанского НЦ РАН*. 2021, № 2 (85), С. 55–60. DOI: 10.33580/2541-9684-2020-84-1-47-56
2. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А., Идармачев И.Ш. Изучение динамики ширины трещины потенциально обвального скального массива струнным датчиком на горе Гуниб (Дагестан) // *Геология и геофизика Юга России*. 2022б, Т. 12, № 2, С. 78–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006
3. Идармачев Ш.Г., Магомедов А.Г., Идармачев А.Ш. Связь деформационных процессов на неустойчивом скальном массиве «Гуниб» в Дагестане с землетрясениями // *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*. 2023, № 2 (93), С. 38–45. (РИНЦ). DOI: 10.33580/2541-9684-2023-93-2-38-45
4. Brian D. Collins & Greg M. Rockfall caused by cyclic thermal stress of flaking cracks • *Stock Volume 9*. 2016.395-400.
5. Shaler, N. S. Notes on the concentric structure of granitic rocks. *Proc. Boston Soc. Nat. Hist.* 12, 289–291 (1869).
6. Gilbert, G. K. Domes and dome structures of the HighSierra. *Geol. Soc. Am. Bull.* 16, 29–36 (1904).
7. Dale, T. N. The commercial granites of New England. *US Geol. Surv. Bull.* 738, 26–38 (1923).
8. Matthes, F. E. Geologic history of the Yosemite valley. *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 160, 137 (1930).
9. Jahns, R. H. Sheet structure in granites: its origin and use as a measure of glacial erosion in New England. *J. Geol.* 51, 71–98 (1943).
10. Martel, S. J. Progress in understanding sheeting joints over the past two centuries. *J. Struct. Geol.* 94, 68–86 (2017).
11. White, W. S. Rock-bursts in the Granite Quarries at Barre, Vermont, Circular 13 (US Geological Survey, 1946).
12. Moser, F. L. *Spatial and Temporal Variance in Rock Dome Exfoliation and Weathering Near Twain Harte, California, USA*. (Thesis, Univ. North Carolina at Charlotte, 2017).

СЕЙСМИЧЕСКОЕ МИКРОРАЙОНИРОВАНИЕ В РАЙОНАХ С ВЫСОКОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТЬЮ НА ПРИМЕРЕ НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА «ЛАЗАРЕСКОЕ»

И.В. Крячков, И.А. Бабуркин

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2
E-mail: pudov0100@mail.ru

Одним из самых опасных в сейсмическом отношении регионов на территории России, наряду с югом Сибири и Дальним Востоком, является Северный Кавказ, где интенсивность сейсмических сотрясений может достигать 9–10 баллов по шкале MSK-64 [6]. Сейсмичность Северного Кавказа обусловлена его принадлежностью, протяженной Крым–Кавказ–Копетдагской зоне, входящей в состав чрезвычайно сейсмоактивного Иран–Кавказ–Анатолийского региона.

Для оценки сейсмической опасности территории Российской Федерации были составлены карты общего сейсмического районирования (ОСР). Общее сейсмическое районирование (ОСР) – это картирование сейсмической опасности в рамках территории страны, основанием для которого является изучение сейсмичности и сейсмического режима, региональных и глобальных сейсмогенерирующих структур [7]. Комплект карт ОСР-2015 состоит из трех нормативных карт А, В, С. Сейсмичность района в баллах шкалы MSK-64: карта А – 8 баллов, карта В – 9 баллов, карта С – 9 баллов.

Однако комплект этих карт предоставляет проектировщику только предварительную оценку сейсмической опасности на площадке строительства. Карты ОСР выражают интенсивность колебаний на средних по сейсмическим свойствам грунтах, без учета уровня грунтовых вод, локальных тектонических нарушений и других факторов. Кроме перечисленных особенностей стоит указать, что расчет карт ОСР-2015 проводился по сетке 25 x 25 км², это, в свою очередь, непосредственно указывает на необходимость проведения уточнения исходной сейсмичности.

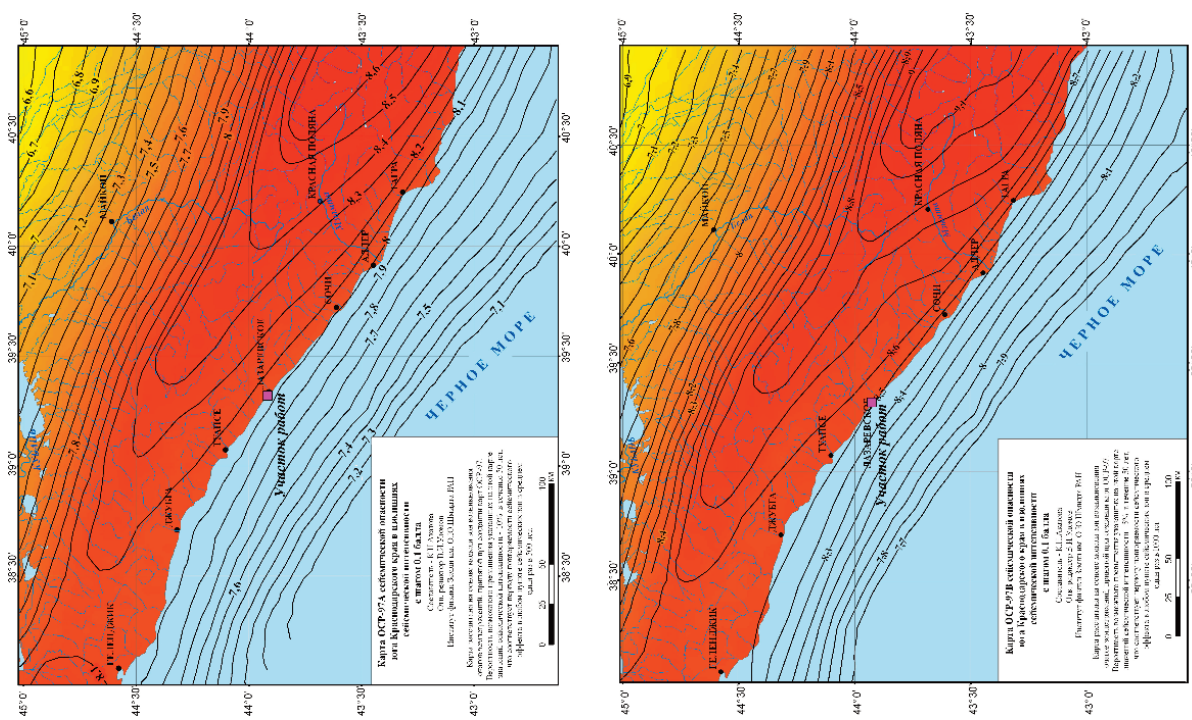


Рис. 1. Фрагмент карт ОСР-97-А и ОСР-97-В

Уточнение исходной сейсмичности проводилось на основе актуализированных карт ОСР-97 для юга Краснодарского края, подготовленных коллективом авторов: В.И. Уломов, А.А. К.Н. Акатова, А.А.

Такое допущение в уточнении исходной сейсмичности возможно на основе сравнения карт ОСР-97 и ОСР-2015 проведенного В.И. Уломовым. Сопоставление карт показывает, что карты ОСР-2015 являются полной компиляцией карт ОСР-97 за исключением нескольких участков. В свою очередь участок работ находится в не затронутой изменениями области карт, поэтому применение актуализированных карт ОСР-97 является правомерным. Фрагменты карт для разной повторяемости приведены на рис. 1.

На фрагменте карты ОСР-97-А (рис. 2) видно, что участок работ расположен между изолиниями сейсмической интенсивности 8,0 – 8,1 балла. Поэтому в качестве уточненной сейсмичности по этой карте принимаем наиболее неблагоприятные условия в сейсмическом отношении - значение 8,1 балла.

На фрагменте карты ОСР-97-В (рис. 2) видно, что участок работ расположен между изолиниями сейсмической интенсивности 8,5 – 8,6 балла. Поэтому в качестве уточненной сейсмичности по этой карте принимаем наиболее неблагоприятные условия в сейсмическом отношении - значение 8,6 балла.

На основании полученных данных следует принять следующие значения исходной сейсмичности для участка работ:

-Для карты ОСР-2015А с периодом повторяемости сейсмических воздействий $T=500$ лет сейсмичность для участка работ составляет 8,1 балла;

-Для карты ОСР-2015В с периодом повторяемости сейсмических воздействий $T=1000$ лет сейсмичность для участка работ составляет 8,6 баллов;

Дополнительно уточнение исходной сейсмичности проводилось на основе расчетов в специализированной программе EAST-2016.

Для уточнения сейсмичности участка исследований были выбраны 17 точек (рисунок 7.5), по которым в последующем и производился расчет. Результаты расчета приведены в таблице 1.

В результате расчетов были получены следующие данные по уточненной сейсмичности:

| <i>Таблица 1</i> | | | | | |
|---------------------------------------|----------|----------|-------------------------------|------|------|
| Уточнения сейсмичности участка | | | | | |
| № точки | WGS84 | | Повторяемость сотрясений, лет | | |
| | Широта | Долгота | 500 | 1000 | 5000 |
| 1 | 43,92551 | 39,31944 | 7,96 | 8,39 | 9,12 |
| 2 | 43,92602 | 39,31941 | 7,96 | 8,38 | 9,08 |
| 3 | 43,9266 | 39,31951 | 7,97 | 8,38 | 9,1 |
| 4 | 43,92701 | 39,31989 | 8 | 8,36 | 9,08 |
| 5 | 43,92734 | 39,3202 | 7,96 | 8,37 | 9,11 |
| 6 | 43,92786 | 39,32055 | 7,95 | 8,37 | 9,12 |
| 7 | 43,92832 | 39,32109 | 7,96 | 8,36 | 9,12 |
| 8 | 43,92857 | 39,32195 | 7,98 | 8,36 | 9,07 |
| 9 | 43,9281 | 39,32226 | 7,96 | 8,36 | 9,1 |
| 10 | 43,92748 | 39,32183 | 7,96 | 8,37 | 9,11 |
| 11 | 43,92784 | 39,32121 | 7,97 | 8,37 | 9,13 |
| 12 | 43,92711 | 39,32122 | 7,95 | 8,36 | 9,09 |
| 13 | 43,92682 | 39,32071 | 7,97 | 8,38 | 9,08 |
| 14 | 43,9263 | 39,32032 | 7,97 | 8,36 | 9,09 |
| 15 | 43,92592 | 39,31994 | 7,98 | 8,36 | 9,14 |
| 16 | 43,92682 | 39,32017 | 7,97 | 8,37 | 9,09 |
| 17 | 43,92754 | 39,32093 | 7,99 | 8,36 | 9,06 |
| Минимальное значение | | | 7,95 | 8,36 | 9,06 |
| Максимальное значение | | | 8,00 | 8,39 | 9,14 |

-Для карты ОСР-2015А с периодом повторяемости сейсмических воздействий $T=500$ лет сейсмичность для участка работ изменяется от 7,98 до 8,0 балла;

-Для карты ОСР-2015В с периодом повторяемости сейсмических воздействий $T=1000$ лет сейсмичность для участка работ изменяется от 8,36 до 8,39 балла;

-Для карты ОСР-2015С с периодом повторяемости сейсмических воздействий $T=5000$ лет сейсмичность для участка работ изменяется от 9,06 до 9,14 балла;

Полученные результаты расчетов удовлетворительно коррелируются с данными по комплекту карт ОСР-97. Отличие в результатах уточнения исходной сейсмичности составляет 0,1-0,2 балла.

Инженерно-геофизические исследования проводились для целей СМР, в частности для получения скоростных характеристик грунтов необходимых для расчетов. В свою очередь, геофизические методы являются одним из видов исследований при инженерно-геологических изысканиях на этапах проектирования и строительства. Поэтому кроме определения скоростных характеристик массива грунтов инженерно-геофизические исследования решали ряд задач для целей инженерно-геологических изысканий [3].

Сейсморазведочные работы проводились с целью получения информации о скоростях распространения в грунтах продольных и поперечных волн, а также для уточнения инженерно-геологической и гидрогеологической обстановки.

Сейсморазведочные исследования проводились методом преломленных волн МПВ-ОГП на поперечных горизонтально-поляризованных (SH) и продольных (P) волнах [2]. Регистрация колебаний производилась сейсмической косой длиной 46 м, общая протяженность одного сейсмозондирования (СЗ) равнялась 46 м. Шаг приёма составлял 2 метра. Пункты возбуждения упругих колебаний (ПВ) располагались на косе и были организованы выносные удары (рис. 2).



Рис. 2. Схема системы наблюдения

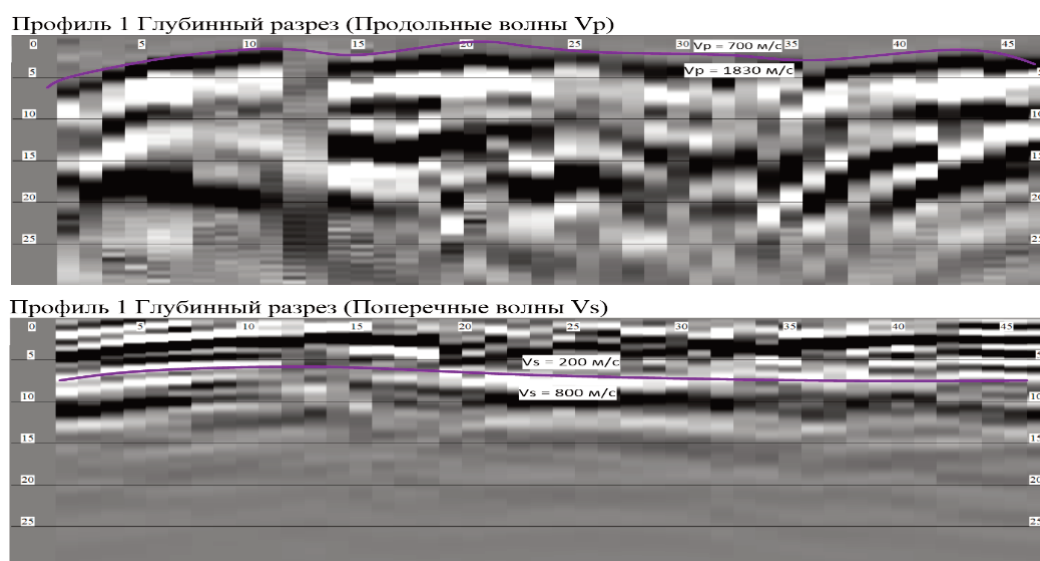


Рис. 3. Глубинные разрезы по СЗ-1 (Z-Z, Y-Y)

После проведения сейсмических работ и процедур обработки, трассы были отсортированы по МПВ-ОГП и просуммированы, что позволило получить временной разрез МПВ, который переводится в глубинный разрез (рис. 3).

Проведение сейсморазведочных работ позволило определить скорости продольных и поперечных волн в массиве, которые в последующем были применены для расчета сейсмической интенсивности. В табличном виде скорости целевых волн показаны в таблице 2.

Также проводились регистрации микросейсм, которые являются полезным вспомогательным методом определения увеличения амплитуд колебаний за счет влияния местных инженерно-геологических, геоморфологических и других условий, а также для оценки доминантных (резонансных) периодов [5]. Регистрацию поля микросейсм особенно рекомендуется выполнять в районах с низкой современной сейсмической активностью.

| Таблица 2 | | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Результаты сейсморазведочных работ | | | | | | |
| № Профиля | $H_{\text{сейсм,гр по } V_s}$ | $V_{s1}, \text{ м/с}$ | $V_{s2}, \text{ м/с}$ | $H_{\text{сейсм,гр по } V_p}$ | $V_{p1}, \text{ м/с}$ | $V_{p2}, \text{ м/с}$ |
| Профиль-1 (СЗ-1) | 8,5 | 200 | 800 | 1,5 | 700 | 1830 |
| Профиль-2 (СЗ-2) | 4,9 | 390 | 1275 | 3,2 | 775 | 2840 |
| Профиль-3 (СЗ-3) | 8,1 | 260 | 515 | 4,3 | 530 | 3230 |
| Профиль-4 (СЗ-4) | 4 | 330 | 815 | 6,5 | 990 | 2300 |
| Профиль-5 (СЗ-5) | 3,1 | 240 | 720 | 1,4 | 480 | 1720 |
| Профиль-6 (СЗ-6) | 5,5 | 250 | 900 | 4,5 | 445 | 2250 |

Расчёт сейсмических жесткостей, является одним из обязательных методов при проведении сейсмического микрорайонирования площадок строительства [1]. Расчет выполняется на основе данных инженерно-геологических изысканий и результатов сейсморазведочных работ. Результаты расчётов по методу сейсмических жесткостей для комплекта карт ОСР-2015 приведены в таблице 3.

| Таблица 3 | | | | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Результаты расчётов по методу сейсмических жесткостей | | | | | | |
| Для карты ОСР-2015 А | | | | | | |
| | $\rho_{\text{ср}}, \text{ г/см}^3$ | $V_{s \text{ ср}}, \text{ м/с}$ | $\Delta I_{\text{сж}}, \text{ балл}$ | $I_{\text{исх}}, \text{ балл}$ | $I_{\text{расч}}, \text{ балл}$ | $I_{\text{прин}}, \text{ балл}$ |
| СЗ - 1 | 2,28 | 225 | 0,18 | 8 | 8,18 | 8,2 |
| СЗ - 2 | 2,38 | 604 | -0,57 | 8 | 7,43 | 7,4 |
| СЗ - 3 | 2,42 | 287 | -0,04 | 8 | 7,96 | 8,0 |
| СЗ - 4 | 2,31 | 513 | -0,43 | 8 | 7,57 | 7,6 |
| СЗ - 5 | 2,19 | 444 | -0,29 | 8 | 7,71 | 7,7 |
| СЗ - 6 | 2,5 | 370 | -0,25 | 8 | 7,75 | 7,7 |
| Для карты ОСР-2015 В | | | | | | |
| | $\rho_{\text{ср}}, \text{ г/см}^3$ | $V_{s \text{ ср}}, \text{ м/с}$ | $\Delta I_{\text{сж}}, \text{ балл}$ | $I_{\text{исх}}, \text{ балл}$ | $I_{\text{расч}}, \text{ балл}$ | $I_{\text{прин}}, \text{ балл}$ |
| СЗ - 1 | 2,28 | 225 | 0,18 | 8,4 | 8,58 | 8,6 |
| СЗ - 2 | 2,38 | 604 | -0,57 | 8,4 | 7,83 | 7,8 |
| СЗ - 3 | 2,42 | 287 | -0,04 | 8,4 | 8,36 | 8,4 |
| СЗ - 4 | 2,31 | 513 | -0,43 | 8,4 | 7,97 | 8,0 |
| СЗ - 5 | 2,19 | 444 | -0,29 | 8,4 | 8,11 | 8,1 |
| СЗ - 6 | 2,5 | 370 | -0,25 | 8,4 | 8,15 | 8,1 |

Метод микросейсм применялся для изучения труднодоступных участков площадки, которые не могли быть исследованы методами сейсморазведки и сопоставления расчета сейсмической интенсивности по двум методам [4].

Результаты расчёта сейсмической интенсивности по методу регистрации микросейсм приведены в таблице 4.

Результаты двух методов расчета сейсмической интенсивности (сейсмических жесткостей и регистрации микросейсм), хорошо коррелируются между собой, расхождение результатов не превышает 0,5 балла и находится в диапазоне от -0,2 до 0,2 балла.

На основании результатов метода сейсмических жесткостей был построен комплект карт сейсмического микрорайонирования (рис. 4).

Результаты расчётов по методу регистрации микросейсм

| № точки наблюдения | f_{max} , Гц | $U(f)_{max}$ | ΔI , балл | ОСР-2015А | | ОСР-2015В | |
|--------------------|----------------|--------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | | | $I_{исх}$, балл | $I_{расч}$, балл | $I_{исх}$, балл | $I_{расч}$, балл |
| МС-1 | 2,2 | 0,51 | -0,47 | 8 | 7,5 | 8,4 | 7,9 |
| МС-2 | 1,9 | 0,67 | -0,28 | 8 | 7,7 | 8,4 | 8,1 |
| МС-3 | 2,6 | 0,44 | -0,57 | 8 | 7,4 | 8,4 | 7,8 |
| МС-4 | 4,7 | 0,87 | -0,1 | 8 | 7,9 | 8,4 | 8,3 |
| МС-5 | 5,1 | 1,03 | 0,02 | 8 | 8,0 | 8,4 | 8,4 |
| МС-6 | 1,4 | 0,72 | -0,23 | 8 | 7,8 | 8,4 | 8,2 |
| МС-7 | 2 | 0,59 | -0,37 | 8 | 7,6 | 8,4 | 8,0 |
| МС-8 | 3,9 | 0,98 | -0,01 | 8 | 8,0 | 8,4 | 8,4 |
| МС-9 | 2,8 | 0,85 | -0,11 | 8 | 7,9 | 8,4 | 8,3 |
| МС-10 | 4,9 | 1,01 | 0,01 | 8 | 8,0 | 8,4 | 8,4 |

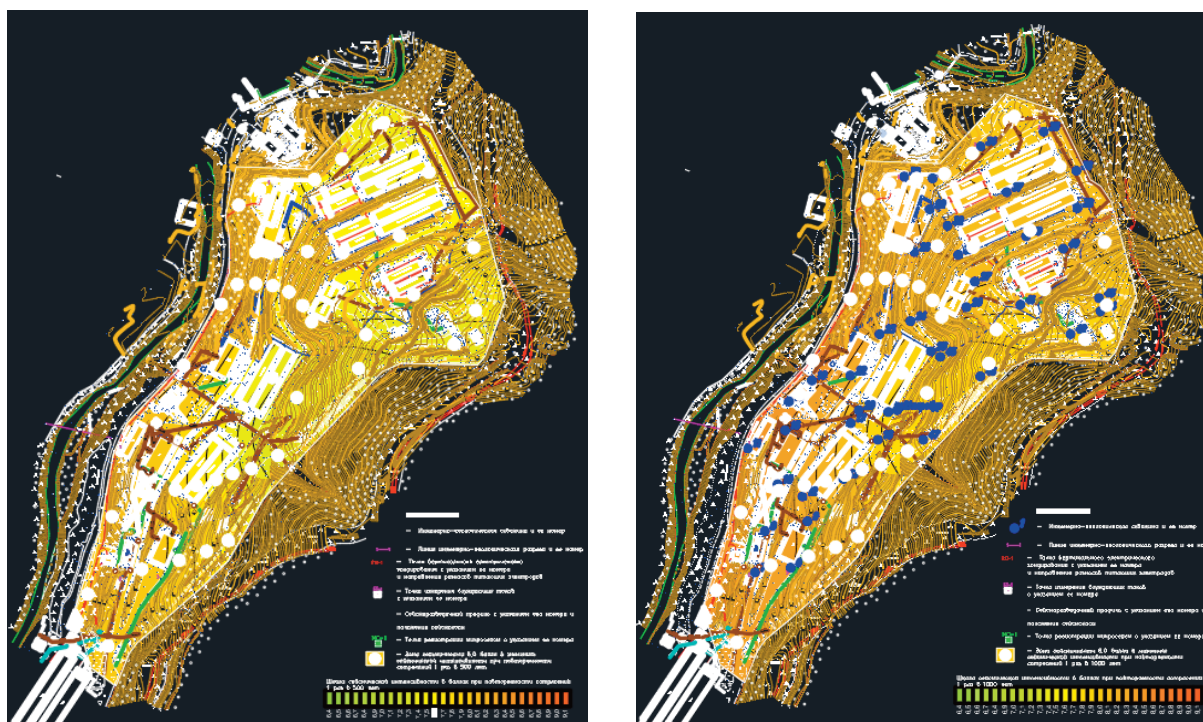


Рис. 4. Комплект карт сейсмического микрорайонирования

По итогу расчетов сейсмическая интенсивность для участка исследований составляет для карты ОСР-2015А с периодом повторяемости сейсмических воздействий $T=500$ лет изменяется в диапазоне от 7,4 до 8,2 балла, а для карты ОСР-2015В с периодом повторяемости сейсмических воздействий $T=1000$ лет изменяется в диапазоне от 7,8 до 8,6 балла. Полученные результаты позволили дать точную оценку сейсмической опасности на территории Краснодарского края в населенном пункте “Лазаревское”. Следует отметить, что по картам ОСР-2015В с периодом повторяемости сейсмических воздействий $T=1000$ лет сейсмичность для участка работ составляет 8,4 баллов, а по инженерно-геологическим изысканиям наблюдается наивысшее значение 8,6 баллов, что приравнивается к 9 баллам. Данное несоответствие указывает на то, что карты ОСР дают только предварительную оценку сейсмической опасности и не позволяют увидеть полную картину на объекте исследования.

Литература

1. *Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. Светоч Плюс, М.: 2011. С. 303.*
2. *Гурвич И.И., Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка. Москва, изд-во «Недра», 1980.*
3. *Павлова О.В. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988.*
4. *Ратникова Л.И. Расчет колебаний на свободной поверхности и во внутренних точках горизонтально-слоистого поглощающего грунта. Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1984. С. 116-121.*
5. *Ратникова Л.И, Левшин А.Л. Расчет спектральных характеристик тонкослоистых сред. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1967, № 3.*
6. *Сейсмическое микрорайонирование. Из-во «Наука» Казахской ССР, Алма-Ата, 1976.*
7. *Сейсмическое микрорайонирование. Из-во «Наука», М.: 1977.*

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕУПЛОТНЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПО КОРРЕЛЯЦИОННЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ КАК ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

В.В. Матвеев, В.В. Шанина

МГУ имени М. В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
E-mail: vladimir@matveev.email

Введение

Оценка напряжения предуплотнения σ'_c обычно проводится на основе результатов компрессионных испытаний [3]. Однако, использование только прямого метода определения затруднительно, поскольку компрессионные испытания длительные и дорогостоящие. Напряжение предуплотнения, полученное по эмпирическим зависимостям [4, 8, 12-18], может использоваться как первое приближение в автоматизированных методах и для оптимизации схемы испытания прямым методом.

Значения, полученные по эмпирическим формулам, также могут использоваться для интерполяции между точками с прямыми определениями для моделирования полей напряжения предуплотнения в массиве. Полученные сведения о напряжении предуплотнения позволяют также оценить коэффициент бокового давления, и, следовательно, напряженное состояние массива. Например, такой подход применяется в методике картирования напряженного состояния массива [7].

Характеристика исследуемых грунтов

Образцы грунтов отобраны на различных участках в г. Москве: пос. Десеновское ($55,52^\circ$ с. ш., $37,38^\circ$ в. д.) и ул. Фадеева ($55,77^\circ$ с. ш., $37,60^\circ$ в. д.) на глубинах от 7,7 до 23,8 м и относятся к юрской системе, являясь морскими отложениями. Для отобранных образцов были определены гранулометрический, химический и минеральный состав, физические свойства. В минеральном составе преобладают в основном смектиты (от 38,5 до 46,5 %). В соответствии с классификацией по ГОСТ 25100-2020 [2] по степени засоленности D_{sal} исследуемые грунты от незасоленных до слабозасоленных (от 0,40 до 0,71 %), тип засоления морской. По относительной деформации набухания без нагрузки ε_{sw} грунты от средненабухающих до сильнонабухающих (от 10,6 до 38,9 %). Исследуемые грунты относятся к глинам тяжелым полутвердым (число пластичности I_p от 42 до 58 %, показатель текучести I_L от 0,07 до 0,24 д. е.). Изменение вышеприведенных показателей с глубиной представлено на рис. 1. В целом, показатели свойств соответствуют литературным данным [5, 9].

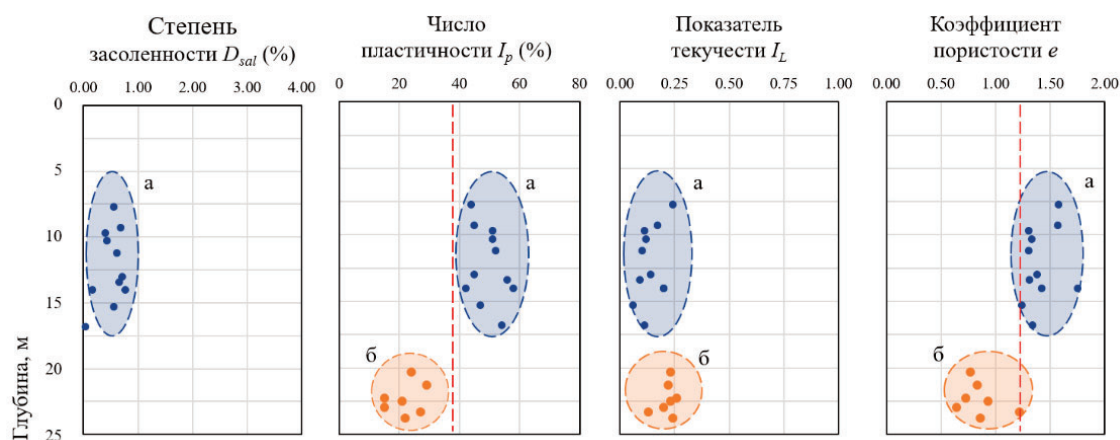


Рис. 1. Изменение показателей исследуемых грунтов с глубиной:
а) пос. Десеновское; б) ул. Фадеева

Методика. Испытания методом компрессионного сжатия проводились в целом по ASTM D 2435 [10] и ГОСТ Р 58326-2018 [3]. Всего проведено 18 компрессионных испытаний в ЦГХЛ ООО «Геоградстрой».

Компрессионные кривые обрабатывали семью графическими методами определения напряжения предварительного уплотнения. Ранее проведенные исследования показывают [6], что наиболее достоверные данные получаются методом Вооне [11], потому что для построений используется ветвь разгрузки, которая нивелирует эффекты невыраженности перегиба компрессионной кривой. Перегиб не выражен вследствие нарушения структуры грунта при пробоотборе и преобладания смешанного характера структурных связей над цементационными в исследуемых грунтах. Графические методы имеют высокий разброс из-за неточности и субъективности графических построений.

Параметры переуплотнения также оценивались по корреляционным зависимостям от показателей физических свойств. Использовались следующие формулы:

Stas, Kulhawy [18]

$$\sigma'_c = p_a 10^{1,11 - 1,62 I_L}$$

Nagaraj [17]

$$\sigma'_c = 10^{5,23 - 4,26(w_e/LL) - 0,174 \log \sigma_0}$$

DeGroot et al. [12]

$$\sigma'_c = 10^{2,9 - 0,96 I_L}$$

Ермолаева и др. [4]

$$\sigma'_c = \exp\left(\frac{\rho_{d0} - 2,12 + 1,08w_L}{0,244w_L}\right)$$

Kootahi, Майне [13]

$$\begin{cases} \log(\sigma'_c/p_a) = 0,17 + 0,86 \log(\sigma'_c/p_a) - 0,09 \log I_L, OCR < 3 \\ \log(\sigma'_c/p_a) = 0,62 + 0,73 \log(\sigma'_c/p_a) - 0,24 \log I_L, OCR \geq 3 \end{cases}$$

где p_a — атмосферное давление.

Чтобы избежать резкого скачка, в нашем исследовании переход между формулами обеспечивался весовой сигмоидной (логистической) функцией.

Параметры переуплотнения также оценивались по корреляционным зависимостям от параметров статического зондирования (СРТ). Данные статического зондирования были получены ООО «Мосгеотех». Использовались следующие формулы:

Майне [15, 16]

$$\sigma'_c = 0,33(q_t - \sigma_{zg})^{m_{IC}}$$

где m_{IC} — показатель, определяемый по диаграмме.

Ladd, Foott [8, 14] (SHANSEP)

$$\begin{aligned} \left(\frac{c_u}{\sigma_0}\right)_{OC} &= \left(\frac{c_u}{\sigma_0}\right)_{NC} OCR^m \\ c_u &= \frac{(q_c - \sigma_{zg})}{N_k} \end{aligned}$$

В нашем исследовании полагается, что

$$\left(\frac{c_u}{\sigma_0}\right)_{NC} \approx 0,22; m \approx 0,8; N_k \approx 14.$$

Результаты

На рис. 2 показано изменение бытового напряжения и напряжения предварительного уплотнения юрских глин в пос. Десеновское с глубиной. Напряжение предварительного уплотнения определялось прямым методом с интерпретацией Вооне [11] (красные маркеры; максимальные и минимальные оценки напряжения предварительного уплотнения отмечены отрезками, поскольку графические ме-

тоды субъективны), с помощью корреляционных зависимостей от показателей физических свойств: Stas, Kulhawy [18] (синие маркеры), DeGroot et al. [12] (оранжевые маркеры), Kootahi, Maune [13] (зеленые маркеры, левая граница для нормальноуплотненных грунтов, правая граница для переуплотненных грунтов, средняя точка с процедурой логистического сглаживания), с помощью корреляционных зависимостей от параметров статического зондирования (СРТ): [16] и SHANSEP.

Легко заметить, что данные, полученные по различным эмпирическим формулам, и экспериментальные значения в целом соответствуют друг другу, образуя полосу шириной 700 кПа вдоль линии бытового напряжения. Напряжение переуплотнения POP варьировалось от 115 до 831 кПа, среднее 650 кПа.

Метод Мауне [16] лучше соответствует экспериментальным данным, чем SHANSEP. При этом наблюдается рост POP с глубиной от 300 до 900 кПа, а OCR , равный 4,0, остается практически постоянным. Вероятно, это связано с особенностью интерпретации данных СРТ.

На рис. 3 показано изменение бытового напряжения и напряжения предварительного уплотнения юрских глин на улице Фадеева с глубиной. Данные, полученные по различным эмпирическим формулам, и экспериментальные значения в целом соответствуют друг другу, образуя полосу шириной 500 кПа вдоль линии бытового давления. Напряжение переуплотнения POP варьировалось от 69 до 372 кПа, среднее 250 кПа.

Данные СРТ образуют широкую полосу, которая тем не менее соответствует экспериментальным данным. Среднее значение POP и OCR , полученное с помощью СРТ, равно 400 кПа и 1,8, соответственно. Значения OCR и POP грунтов, отобранных в пос. Десеновское, выше, чем на улице Фадеева. Вероятно, это связано с близостью к реке Десна (менее 0,5 км) и, как следствие, большей мощностью размытых грунтов. На улице Фадеева расстояние до ближайшей реки Москвы не менее 3 км, а OCR 1,2-1,9.

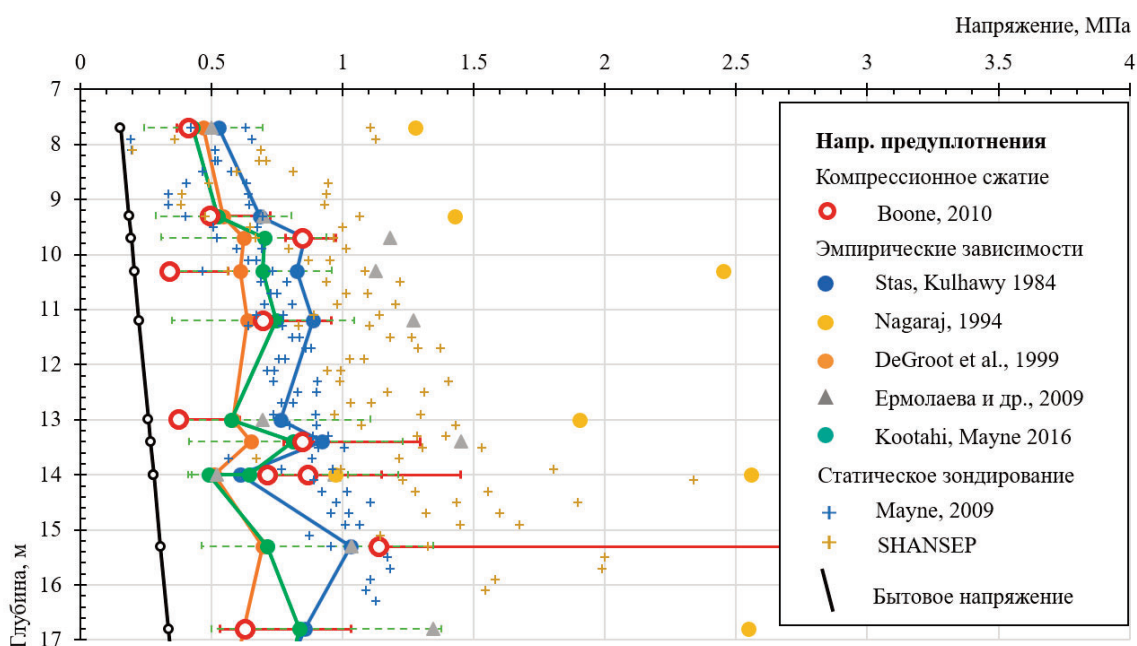


Рис. 2. Изменение с глубиной напряжения предуплотнения юрских глин, определенного различными методами на площадке в пос. Десеновское

Заключение

Любые эмпирические формулы, основанные на корреляционных зависимостях следует использовать с особой осторожностью, обращая внимание на их физический смысл, методику получения зависимости, количество используемых опытов и разновидностей грунтов, силу корреляционной связи, а также условия применимости для данных грунтов в конкретном регионе.

Наиболее точными и стабильными из рассмотренных в нашем исследовании эмпирических формул следует признать: на основе данных статического зондирования — Мауне [16]; на основе показателей физических свойств — Kootahi, Maune [13]. При этом использование весовой функции-

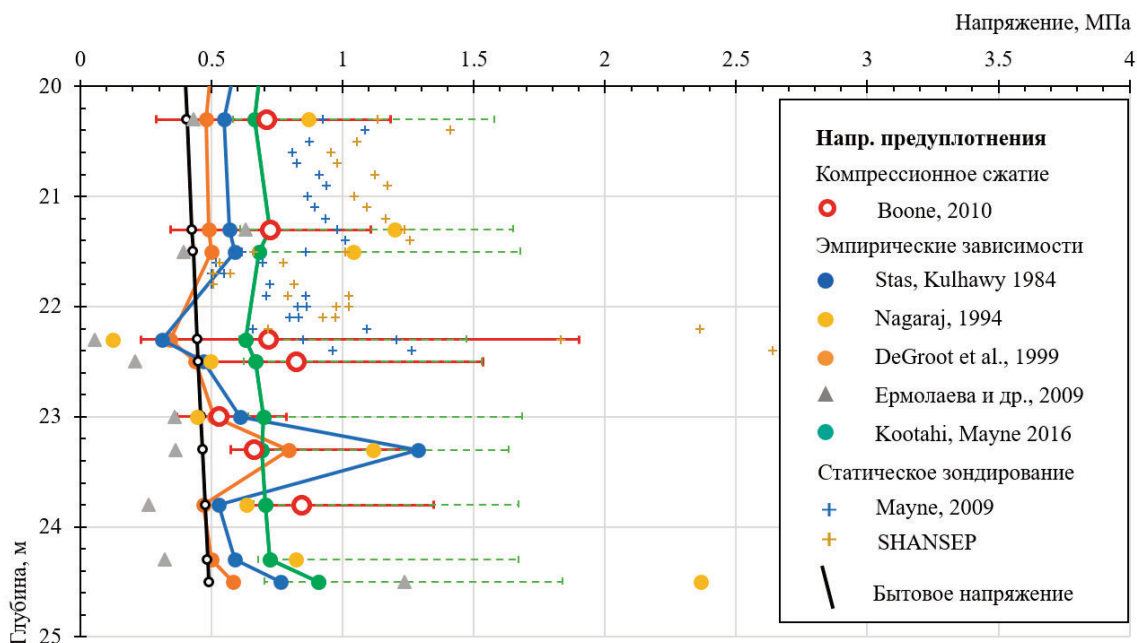


Рис. 3. Изменение с глубиной напряжения предуплотнения юрских глин

сигмоиды для постепенного перехода между обеими формулами зависимости обеспечило оценку напряжения предуплотнения, сопоставимую с наиболее точным прямым методом Boone [11]. Зависимости DeGroot et al. [12] и Stas, Kulhawy [18] предоставляют удовлетворительную оценку и тоже могут рекомендоваться к использованию. Зависимости Nagaraj [17] и Ермолаевой [4] показали нестабильный результат, их следует использовать с осторожностью.

Сведения о напряжении предуплотнения, полученные с использованием эмпирических формул и интерполяции, позволяют построить модель напряженного состояния массива дисперсных грунтов.

Литература

- ГОСТ 12248.4-2020 Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. – М.: Стандартинформ, 2020. – 14 с.
- ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2020. – 38 с.
- ГОСТ Р 58326-2018 Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения. – М.: Стандартинформ. 2018. – 14 с.
- Ермолаева А. Н., Векшина Т.Ю., Засорина А.А. Оценка степени переуплотнения глинистых грунтов в природном залегании // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2009. – Т. 256. – С. 33-41.
- Кудряшова Е. Б. Закономерности формирования переуплотненных глинистых грунтов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Москва, 2002. – 149 с.
- Матвеев В. В., Шанина В. В. Систематизация факторов, влияющих на точность графических построений для определения напряжения предуплотнения // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Выпуск 23. — ГеоИнфо Москва, 2022. с. 301–308.
- Матвеев В. В., Шанина В. В. К вопросу разработки методики составления карты оценки анизотропии естественного напряженного состояния дисперсных грунтовых массивов // Сергеевские чтения. Региональная инженерная геология и геоэкология. Выпуск 25. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (28-29 марта 2024 г.). — Т. 25. — Геоинфо Москва: 2024. — С. 381–385.
- СП 23.13330.2018 Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 (с Изменением N 1) М.: Стандартинформ, 2019. – 122 с.
- СТО 36554501-020-2010 Деформационные и прочностные характеристики юрских глинистых грунтов Москвы. М.: ОАО «НИЦ «Строительство», 2010. – 15 с.

10. ASTM D2435 – 04. *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*, ASTM International, 2004
11. Boone, S.J. A critical reappraisal of “preconsolidation pressure” interpretations using the oedometer test. *Canadian Geotechnical Journal*. 2010, vol. 47, no. 3, pp. 281–296.
12. DeGroot, D. J., Knudsen, S., and Lunne, T. (1999). «Correlations among $p'c$, su , and index properties for offshore clays.» *Proc., Intl. Conf. on Offshore and Nearshore Geotech. Engrg*, Balkema, Rotterdam, 1999. Pp. 173–178.
13. Kootahi, Karim & Mayne, Paul. *Index Test Method for Estimating the Effective Preconsolidation Stress in Clay Deposits*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2016. 142. 04016049. 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001519.
14. Ladd, C.C., & Foott, R. *New design procedure for stability of soft clays*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1974. 11.
15. Mayne, P.W. *Generalized CPT method for evaluating yield stress in soils*. *Geocharacterization for Modeling and Sustainability (GSP 234)*, ASCE, Reston, Virginia: 2014. Pp. 1336-1346.
16. Mayne, P.W., Coop, M.R., Springman, S., Huang, A-B., and Zornberg, J. *State-of-the-Art Paper (SOA-1): Geomaterial Behavior and Testing*. *Proc. 17th Intl. Conf. Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*, 2009. Vol. 4 (ICSMGE, Alexandria, Egypt), Millpress / IOS Press Rotterdam: 2777-2872.
17. Nagaraj T. S., Pandian, N. S. Narasimha Raju, P. S. R.. «Stress-state-permeability relations for overconsolidated clays.» *Geotechnique*, 44(2). 1994. Pp. 349–352.
18. Stas C. V., Kulhawy, F. H. «Critical evaluation of design methods for foundations under axial uplift and compression loading.» *Rep. No. EL-3771*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1984.

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕВИХИНСКОГО РУДНИКА, СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, В.Ю. Наволокина, А.Ю. Смирнов

ИГД УрО РАН, 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка 58
E-mail: luserib@mail.ru; ribnikoff@yandex.ru

Горнодобывающая промышленность является значимым фактором преобразования окружающей среды и источником повышенной геохимической нагрузки на природные комплексы горнопромышленных территорий. Одной из распространенных проблем являются кислые шахтные воды, которые формируются не только при отработки сульфидсодержащих месторождений, но и после завершения их отработки. Для очистки кислых шахтных вод, как правило, проводится их нейтрализация известковым молоком. В результате в осветлительных прудах накапливается техногенный грунт (шлам), состав которого определяется характеристиками воды и видом используемого нейтрализующего вещества. Объемы накопленного за несколько десятилетий техногенного грунта на закрытых медноколчеданных рудниках Среднего Урала (Левихинский, Карпушихинский, Ломовский, Дегтярский) составляет десятки млн м³. По мере заполнения емкости пруда-осветлителя снижается эффективность очистки кислых шахтных вод. возникает вопрос об утилизации шлама. Такие грунты являются с одной стороны источником накопленного вреда окружающей среде на горнопромышленных территориях, с другой могут рассматриваться как потенциальные техногенные месторождения минерального сырья.

Целью работы является изучение состава техногенных грунтов для обоснования направлений по их утилизации и оценки потенциальной извлекаемой ценности компонентов.

Объектом исследования является техногенный грунт (шлам пруда-осветлителя) на закрытом Левихинском медноколчеданном месторождении (Свердловская область). Месторождение обрабатывалось с 20-х годов прошлого века до 2003 г. Пруд-осветлитель создан в 1960 г. и расположен в долине р. Левихи на левом берегу р. Тагил (бассейн Северного Ледовитого океана). Согласно паспорту гидротехнического сооружения, его площадь 142 га, общий объем 3200 тыс. м³ [4]. В настоящее время объем накопленного грунта около 3 млн м³. Максимальная измеренная мощность техногенных отложений составила 7 м (в точке № 1), в остальных точках оценить ее не удалось из-за наличия на дне уплотненного шлама. Слой воды составляет 1–4 м.

Исследования включали отбор проб шлама и воды из пруда-осветлителя. Минералогический состав грунта анализировался с применением дифрактометрического анализа. Для определения макро- и микроэлементного состава проб использовали спектрометрические (ИСП-АЭС) и классические методы аналитической химии (потенциометрические, титриметрические и гравиметрические методы). На месте определяли значения рН, Eh, TDS и t°C.

Для расчета форм нахождения элементов в растворе и индексов насыщения использовали физико-химическое моделирование с помощью программного продукта Visual MINTEQ 3.1 [8].

Коэффициент опасности определялся как $Ko = Ci / C_{пдк}$, где C_i – концентрация i -го вещества; $C_{пдк}$ – предельно допустимая концентрация i -го вещества в почве (ПДКп [6]) либо для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДКрх [3]).

Роль донных отложений в процессах сорбции и поглощении компонентов оценивалась с использованием коэффициента донной аккумуляции или коэффициент распределения CR, который в соответствии с [2, 7] определяется как отношение концентрации элементов в донных отложениях (X_s) к концентрации тех же элементов в воде (X_w): $CR = X_s / X_w$.

В минералогическом составе шлама преобладают три основных минерала: это гипс, бассанит и гетит (рис. 1). Массовая доля сульфатов (гипс и бассанит) составляет 65–72%. Содержание оксидов и гидроксидов железа, представленных в основном гетитом, варьируется от 12 до 20%. Отмечается небольшое содержание (меньше 10%) карбонатов (кальцит), глинистых минералов (в основном гидрослюда) и хлорсодержащих солей (карналлит). В небольшом количестве (до 1%) в нескольких пробах обнаружен пирит [5].

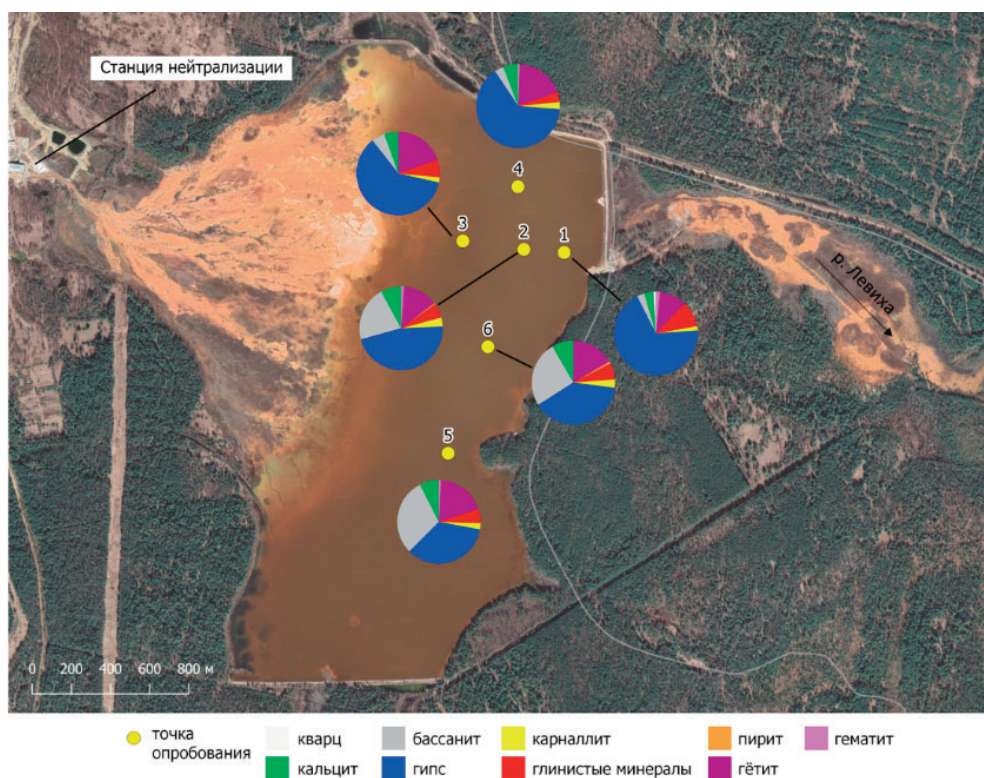


Рис. 1. Точки опробования в пруду-осветлителе и минеральный состав проб техногенного грунта, массовая доля, %

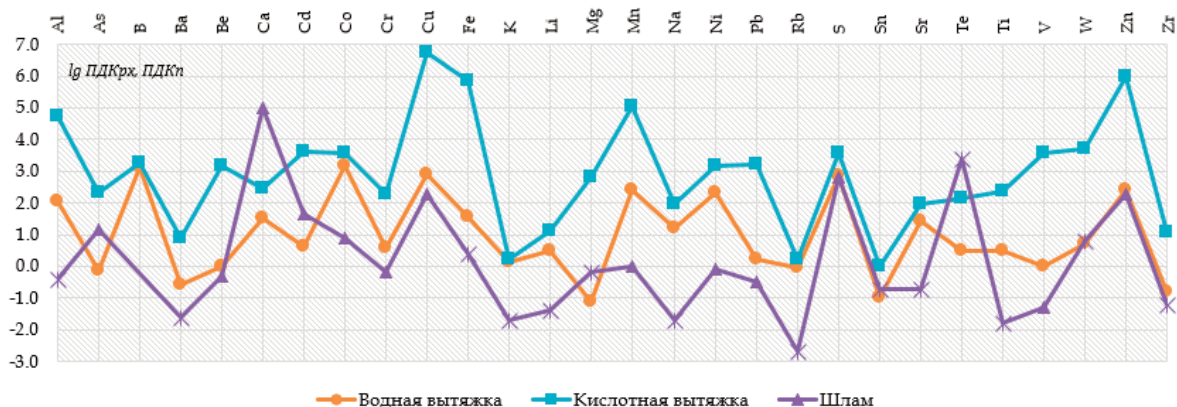


Рис. 2. Коэффициент опасности элементов в шламе (кратность ПДКп), водной и кислотной вытяжках (кратность ПДКрх)

В химическом составе грунта 5 элементов имеют высокие значения коэффициента опасности: это Cu, Zn, Cd, As, Co. В концентрациях, превышающих предельно допустимые концентрации в почвах ПДКп, содержатся элементы I (Zn, Cd, As), II (Cu, Co, Ni) и III (Mn) классов опасности (рис. 2). Анализ водной вытяжки показал значительные превышения предельно допустимых концентраций в водоемах рыбохозяйственного значения ПДКрх по 19 элементам (самые значительные по Co и B), в кислотной вытяжке таких элементов 28 (самые существенные по Cu, Zn и Fe).

В табл. 1 и на рис. 3 представлены результаты корреляционного анализа состава техногенного грунта (ТГ), водной (ВВ) и кислотной вытяжки (ВК). Для анализа были отобраны 16 элементов, для которых выявлено превышения ПДК во всех исследуемых массивах данных. Высокие коэффициенты корреляции (больше 0,7) между элементами в техногенном грунте и в кислотной вытяжке установлены для большинства из рассмотренных пар данных. Для пары «техногенный грунт - водная вытяжка» высокий коэффициент корреляции имеется только для Ca.

Состав воды в пруду-осветлителе сульфатный, среди катионов в переменном количестве присутствуют Mg, Ca и Al. Воды кислые (pH=3.1-4.4). Минерализация изменяется от 1.5 до 5 г/л.

Коэффициенты корреляции между содержанием элемента в техногенном грунте, водной и кислотной вытяжке

| Элемент | КВ-ТГ (R2) | ВВ-ТГ (R3) | ВВ-КВ (R1) |
|---------|------------|------------|------------|
| Al | 0,5 | 0,2 | -0,4 |
| As | 0,8 | -0,3 | -0,2 |
| Ca | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Cd | 0,9 | -0,6 | -0,5 |
| Co | 0,9 | -1,0 | -1,0 |
| Cu | 0,9 | 0,5 | 0,4 |
| Fe | 0,6 | 0,5 | 0,9 |
| K | 0,5 | 0,5 | 0,9 |
| Li | 0,8 | -0,3 | -0,7 |
| Mg | -0,4 | -0,9 | 0,2 |
| Mn | 0,9 | -0,6 | -0,5 |
| Na | 0,0 | 0,0 | -0,6 |
| Rb | -0,1 | 0,2 | 0,5 |
| S | -0,3 | -0,4 | 0,9 |
| Sr | 0,9 | 0,4 | 0,5 |
| Zn | 1,0 | -0,4 | -0,3 |

Примечание. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции больше 0,5.

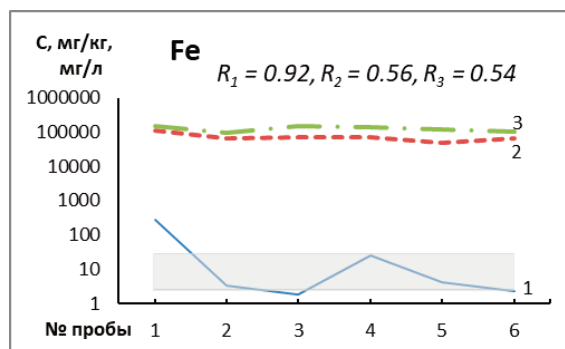
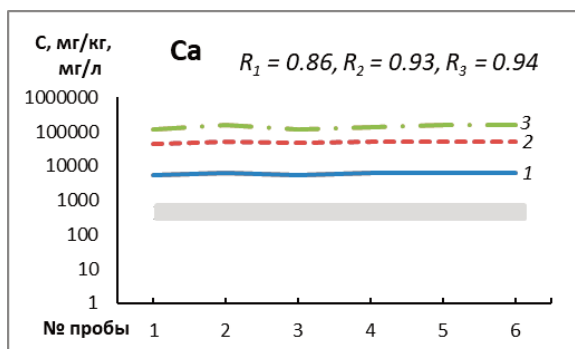
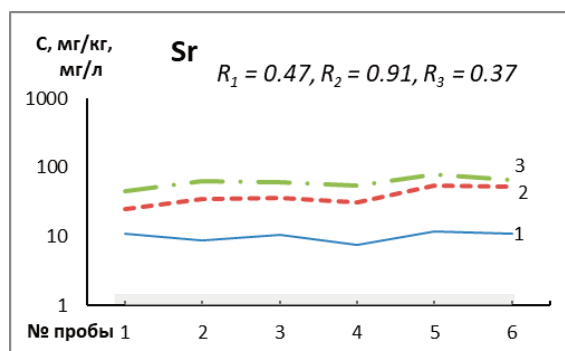
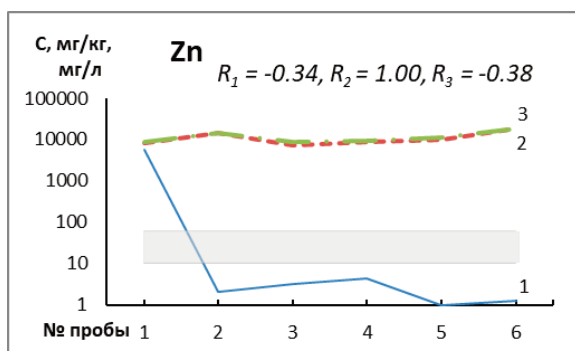


Рис. 3. Концентрация элементов в техногенном грунте (3), в кислотной (2) и водной (1) вытяжке и в пруду-осветлителе (серая область, диапазон значений); коэффициент корреляции R1 — между водной и кислотной вытяжкой, R2 — между кислотной вытяжкой и техногенным грунтом, R3 — между водной вытяжкой и техногенным грунтом

По данным физико-химического моделирования двухзарядные катионы (Ca, Mg, Fe) мигрируют преимущественно в ионно-растворенной форме, трехзарядные ионы (Fe и Al) - в виде комплексов. Во время половодья (апрель 2021 г.) преобладающей формой миграции железа становится $Fe(OH)_2^+$ (рис. 4).

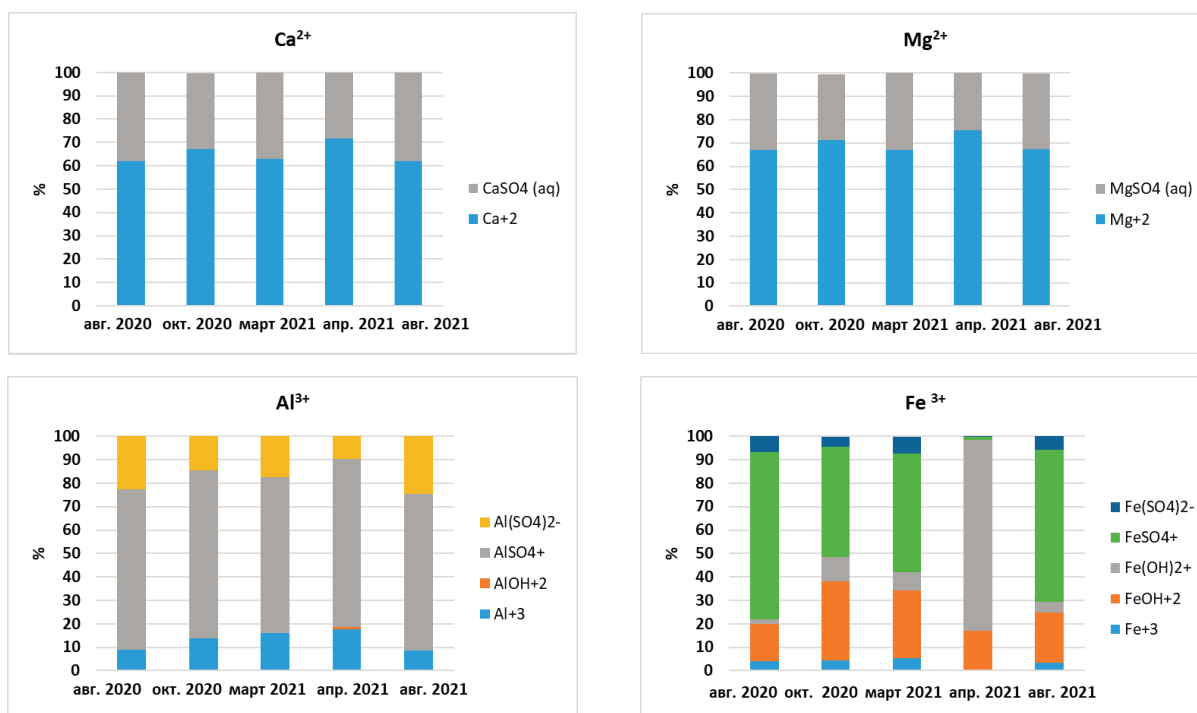


Рис. 4. Формы миграции химических элементов

Для определения уровня накопления тяжелых металлов в техногенном грунте был рассчитан коэффициент распределения (CR). Высокие значения CR свидетельствуют об интенсивной миграции металлов из водной среды в донные отложения, что происходит в результате процессов осаждения, сорбции или хемосорбции металла в техногенный грунт.

Наиболее активно процессы накопления отмечаются по Cu (CR более $20 \cdot 10^3$ л/кг) и Al, Fe (CR более $4 \cdot 10^3$ л/кг) (рис. 5). По этим же компонентам по результатам термодинамического моделирования можно отметить образование таких минералов, как $AlOH_2SO_4$, $CuFe_2O_4$, $FeO(OH)$ и $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (рис. 6).

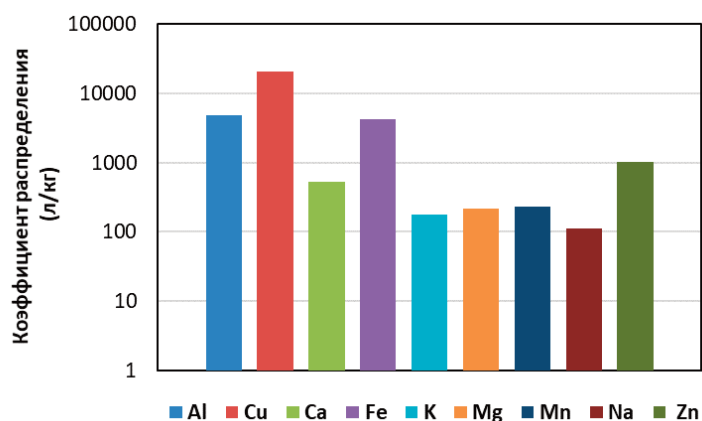


Рис. 5. Коэффициент распределения в системе вода-техногенный грунт

Количество ценных компонентов в техногенном грунте составляет (тыс. т) 1,1 меди (около 0,5 % сухой массы) и 2,4 цинка (1 %). Ценность сырья в недрах [1] составляет (в млн руб.) по меди более 728 и по цинку 550 [5]. Техногенный грунт может потенциально рассматриваться как техногенно-минеральное месторождение (при наличии соответствующей технологии извлечения полезных компонентов). Содержание золота и серебра в кислотных вытяжках ниже предела обнаружения.

Полученные результаты позволили установить состав техногенных грунтов, образованных после нейтрализации кислых шахтных вод, и оценить их потенциальную ценность как источника мине-

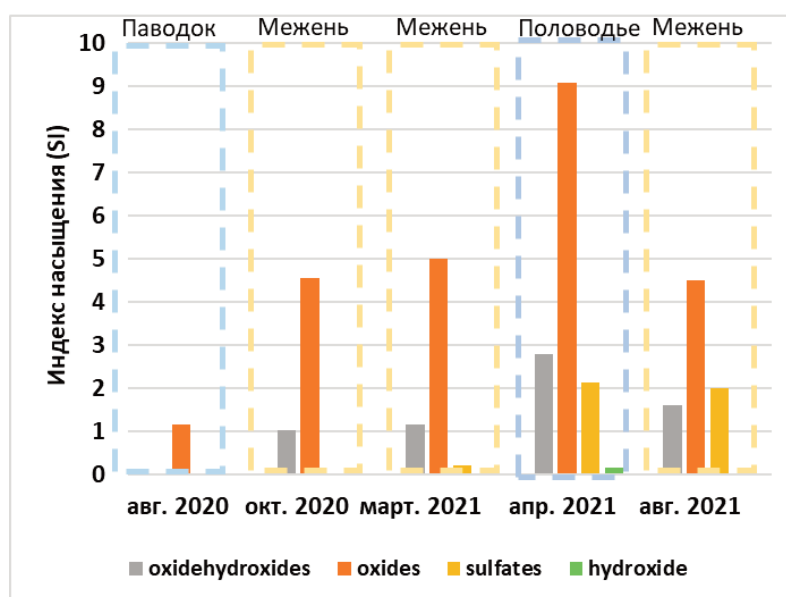


Рис. 6. Индексы насыщения воды в пруду-осветлителе по отношению к группам минералов

рального сырья. Полученные результаты позволят обосновать направления по ликвидации накопленного вреда окружающей среде на горнопромышленных территориях Среднего Урала.

Работа выполнена при поддержке Государственного задания ИГД УрО РАН. Тема 2 (2025-2027) Геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении ресурсов недр (FUWE-2025-0002). Г.р. № 1022040300092-1-1.5.1

Литература

1. Душин А.В. Теоретико-методологические основы государственного регулирования воспроизводства минеральносырьевой базы: автореферат дис. д-ра геол.-минерал. наук. – Екатеринбург, 2014. – 46 с
2. Методика (1992) «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия». Утв. Минприроды РФ 30.11.1992 г.
3. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. – М.: Изд-во ВНИРО, 2011. – 257 с. (Утверждены приказом Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552 с изменениями на 13 июня 2024 года).
4. Паспорт гидротехнического сооружения закрытого Левихинского рудника. – Екатеринбург: ООО «ЭКОЛОГИЯ», ОАО «УНИПРОМЕДЬ», 2006. – 68 с.
5. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Реабилитация техногенных объектов отработанных медноколчеданных месторождений на примере Левихинского рудника (Средний Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 8. С. 137-150.
6. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: введен в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2 (с изменениями на 30 декабря 2022 года).
7. Pak G, Jung M, Kim H, KJB, Chung G, Kim S, Kim Y, Oa S, Yoon J (2016) Assessment of metals loading in an acid mine drainage watershed. *Mine Water and Environment* 35: 44-54.
8. Visual MINTEQ. - URL: <https://vminteq.lwr.kth.se/> (дата обращения: 03.12.2024).

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИНОФОРМ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА

В.Б. Свалова

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2
Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а
E-mail: v-svalova@mail.ru

Структуры клиноформ осадочного чехла связаны с месторождениями углеводородов во многих регионах России и мира, что делает их изучение особенно важным и необходимым.

Клиноформа (Rich J.L., 1951) – обстановка осадконакопления, соответствующая наклонному рельефу дна водоема от зоны приобья до глубоководных частей. В современной литературе термин клиноформа применяют для обозначения линзовидных в разрезе седиментационных тел с отчетливыми первичными наклонами слоев, сложенных обломочными породами и формирующихся в склоновой части палеобассейна седиментации за один цикл колебаний. В новом значении термин клиноформа широко используют в стратиграфии, особенно при изучении нефтегазоносных осадочных толщ. Некоторые исследователи считают клиноформы особым видом литостратиграфических или стратиграфических подразделений, другие рассматривают как термин свободного пользования. В крупных платформенных бассейнах (например, на Западно-Сибирской платформе) клиноформы протягиваются вдоль их окраин на сотни км при ширине в первые десятки километров (рис. 1 а, б).

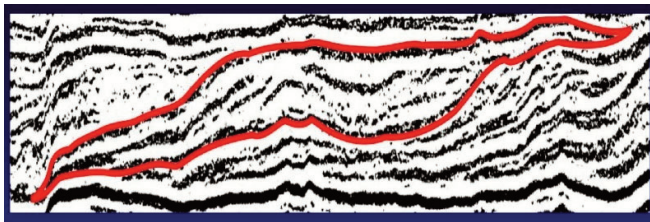


Рис. 1 а. Клиноформа осадочного чехла. Западная Сибирь [2]

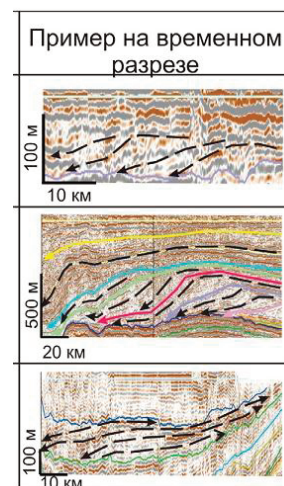


Рис. 1 б. Клиноформы осадочного чехла. Восточное Предкавказье [1]

Механико-математическое моделирование гравитационного движения масс по оползневому склону позволяет описать характерные черты формирования геологических структур, таких как клиноформы осадочного чехла или оползни.

Для структур осадочного чехла важно понимать, при каких значениях параметров геологической среды могут формироваться клиноформы.

При моделировании оползневой процесса можно найти области максимальных скоростей движения геологической среды, где наиболее предпочтительно установить пост мониторинга.

Будем рассматривать медленное движение оползневых масс по склону как движение высоковязкой несжимаемой ньютоновской жидкости, описываемой приближенным уравнением Навье-Стокса [4-6]. Пусть характерный горизонтальный масштаб тела оползня L значительно превосходит его толщину h . Будем также считать оползень достаточно протяженным в плане, что позволяет трехмерную модель рассматривать как двумерную для сечений оползневой тела.

Медленные деформации литосферы моделируются с помощью модели вязкого течения в многослойной несжимаемой высоковязкой ньютоновской жидкости с использованием уравнения Навье-Стокса (1) и уравнения неразрывности (2):

$$dv/dt = F - (1/r)\text{grad } p + (\mu/r)\Delta v \quad (1)$$

$$\text{div}v=0 \quad (2)$$

где: v – вектор скорости, F – сила тяжести, p – давление, r – плотность, μ – вязкость, t – время.

Введем безразмерные значения координат, скоростей и давления X, Y, Z, U, V, W, P :

$$x=LX, y=LY, z=hZ, u=u_0U, v=u_0V, w=u_0(h/L)W, p=r_0ghP. \quad (3)$$

где: r_0, u_0 – характерные значения плотности и скорости.

Тогда можно получить в безразмерной форме уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности для медленных движений в тонком слое для двумерного случая:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial X} = \alpha\mu \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \\ \frac{\partial P}{\partial Z} = -\rho \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{F}{R\left(\frac{h}{L}\right)^3}, \quad F = \frac{u_0^2}{gL}, \quad R = \frac{u_0 L \rho_0}{\mu_0} \quad (6)$$

где: F – число Фруда, R – число Рейнольдса, ρ_0, μ_0, u_0 – характерные масштабы плотности, вязкости и скорости. Силы на верхней границе равны 0 (свободная поверхность).

Тогда можно получить распределение полей скоростей и давлений в слое:

$$P = \rho(\zeta^* - Z)$$

$$U = U_0 + \frac{\rho}{2\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} [(\zeta^* - Z)^2 - (\zeta^* - \zeta_0)^2]$$

$$W = W_0 + \frac{\partial U_0}{\partial X} (\zeta_0 - Z) + \frac{\rho}{\alpha\mu} \frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial X^2} \left[\frac{1}{6} (\zeta^* - Z)^3 + \frac{1}{3} (\zeta^* - \zeta_0)^3 - \frac{1}{2} (\zeta^* - Z)(\zeta^* - \zeta_0)^2 \right] +$$

$$\frac{\rho}{2\alpha\mu} \left(\frac{\partial \zeta^*}{\partial X} \right)^2 (Z - \zeta_0)^2 + \frac{\rho}{\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} \frac{\partial \zeta_0}{\partial X} \zeta_0 (\zeta^* - \zeta_0)$$

где: ζ_0 – нижняя граница слоя, ζ^* – верхняя граница.

Пусть на нижней границе выполняется условие прилипания:

$$U_0 = W_0 = 0$$

Расход масс вдоль слоя имеет вид:

$$Q = \int_{\zeta_0}^{\zeta^*} U dZ = - \frac{\rho}{3\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} (\zeta^* - \zeta_0)^3$$

Т.к. $Q = \text{const}$ вдоль X , то:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial X^2} (\zeta^* - \zeta_0)^7 + \frac{9\alpha\mu Q}{\rho} \left[\frac{3\alpha\mu Q}{\rho} + (\zeta^* - \zeta_0)^3 \frac{\partial \zeta_0}{\partial X} \right] = 0$$

Условие выпуклости верхней границы имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial X^2} < 0 \Rightarrow$$

$$\frac{3\alpha\mu Q}{\rho} > -(\zeta^* - \zeta_0)^3 \frac{\partial \zeta_0}{\partial X}$$

Это выражение дает возможность проанализировать форму поверхности движущейся массы (рис. 2).

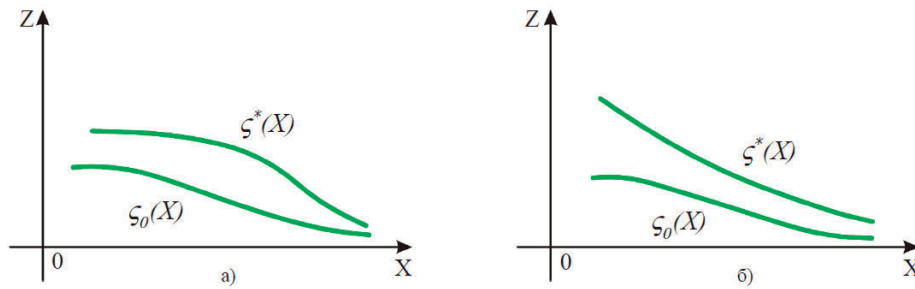


Рис. 2. Различная возможная форма оползневой поверхности: а) – выпуклая, б) – вогнутая

Выпуклая поверхность возникает, если:

1. Q велико, т.е. расход вещества велик, поток интенсивный;
2. μ велико. Это означает, что вязкость велика, вещество плохо растекается и может поддерживать большой угол;
3. ρ мало, т.е. вещество рыхлое;
4. $\text{grad}\zeta_0$ мал, т.е. нижняя поверхность пологая;
5. $(\zeta^* - \zeta_0)$ мало, т.е. толщина слоя мала.

При анализе полученных условий следует отметить, что все они представляются достаточно естественными для объяснения формирования на склоне структур типа наплывов и клиноформ осадочного чехла, что говорит о корректности и представительности модели.

Важным представляется вопрос определения места максимальных скоростей на склоне. При решении вопроса о расположении поста мониторинга на оползневом склоне оптимальным местом для размещения датчиков скоростей движения масс является точка максимальных скоростей движения в массиве пород.

Рассмотрим массив осадочных пород с верхней границей ζ^* , представляющей оползневый склон. Нижнюю границу совместим с осью X . Максимум горизонтальной скорости U достигается на верхней границе ζ^* массива вследствие условия:

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{\rho}{\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} (\zeta^* - Z) = 0 \Rightarrow Z = \zeta^*$$

Точку максимальной горизонтальной скорости на поверхности находим из условия равенства нулю первой производной:

$$\frac{\partial U^*}{\partial X} = 0, \text{ где } U^* = -\frac{\rho}{2\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} (\zeta^*)^2$$

Отсюда легко получить условие:

$$\frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial X^2} \zeta^* + 2\left(\frac{\partial \zeta^*}{\partial X}\right)^2 = 0$$

Следует иметь в виду, что (X) является известной наблюдаемой функцией – поверхностью оползневого склона. И полученное условие позволяет найти точку на склоне, где скорость движения максимальна.

Рассмотрим для наглядности и иллюстрации полученного решения поверхность оползня в виде (рис. 3):

$$\zeta^*(X) = -thX + 1$$

Тогда условие (1) дает:

$$th^2 X - thX - 1 = 0,$$

Откуда получаем:

$$thX = \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \text{ и } \zeta^* = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,62$$

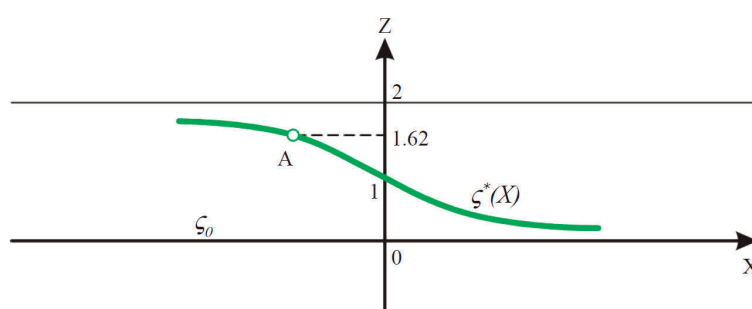


Рис. 3. Точка А - точка максимальной горизонтальной скорости движения масс на поверхности склона

Такое расположение точки А максимальной горизонтальной скорости представляется реальным, а более точные данные о строении массива и его поверхности дадут возможность определить такую точку на конкретном склоне. Именно точка максимума скорости на склоне определяет место возможного срыва оползня в случае достижения предельных напряжений в массиве пород.

Точек локального максимума скорости на склоне может быть несколько, что характеризует возможность срыва оползня на каждой террасе склона.

Аналогичная модель вязкой несжимаемой жидкости может использоваться для расчета поражения площади оползневым процессом при сходе оползня или для моделирования селевого и лавинного процесса.

Финансирование

Статья подготовлена в рамках выполнения госзадания № 122022400105- 9 по теме «Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий».

Литература

1. Бабина Е.О., Мордасова А.В., Ступакова А.В., Титаренко И.А., Сауткин Р.С., Воронин М.Е., Величко М.А., Махнутина М.Л., Колесникова Т.О., Цыганкова А.А. Условия накопления олигоцен-нижнемиоценовых майкопских клиноформ Центрального и Восточного Предкавказья как ключевой критерий прогноза природных резервуаров // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 2. С. 192–208. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2022.2.18> УДК 553.982
2. Гурари Ф. Г. Структура и условия образования клиноформ Западно-Сибирской плиты (история становления представлений). Новосибирск: СНИИГГиМС, 2003. 141 с.
3. Свалова В.Б. Геоэкологические аспекты геодинамических процессов в литосфере. Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. 2023 г. 367 стр.

4. Свалова В.Б. Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона // Геология и геофизика Юга России. 2020. 10(4). С. 52-69. DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004.
5. Свалова В.Б. Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование // Геология и геофизика Юга России. 2021. 11 (3). С. 76 – 92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007
6. Свалова В.Б. Механико-математическое моделирование формирования и эволюции геологических структур в связи с глубинным мантийным диапиризмом. // Мониторинг. Наука и технологии. 2014. №3(20). С. 38-42.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ РЕЖИМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ КАК ВРЕМЕННОГО РЯДА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

А.А. Шиманов

Государственное природоохранное бюджетное учреждение «Мосэкомониторинг», 1
19019, г. Москва, ул. Новый Арбат, д.11, стр.1
E-mail: inferit90@mail.ru

Введение

Прогноз параметров геологической среды, таких как уровень подземных вод, поровое давление, температура, деформации является актуальной научной и производственной задачей. Как правило, такие прогнозы строятся при помощи программных комплексов для численного моделирования. Другим, активно развивающимся, методом прогнозирования является машинное обучение [1, 5, 6]. Данная работа посвящена применению методов машинного обучения для прогноза уровня грунтовых вод.

Объект и методика исследования

Исходными данными для построения прогноза являлись результаты режимных наблюдений за уровнем подземных вод на территории города Москвы. Уровень подземных вод в работе рассматривается как зависимые между собой наблюдения – временной ряд. Использовались значения уровня подземных вод по 14 скважинам, относящимся к различным водоносным горизонтам за период с 1 января 1990 по 1 декабря 2024 года. Периодичность измерения уровня грунтовых вод составляла около 10 дней. Измерения уровня подземных вод выполнялись сотрудниками ГПБУ «Мосэкомониторинг» [2] и АО «Геоцентр-Москва» [3].

На первом этапе работы была выполнена предобработка данных. Из исходных данных были убраны «аномалии» - опечатки и т.д. Такие единичные значения могли существенно исказить и ухудшить результаты прогноза. Стоит отметить, что из результатов наблюдений более чем за 30 лет по 14 скважинам было отбраковано около 10 измерений. Такой подход к предобработке данных был выбран с целью сохранения максимальной полноты данных. Другой причиной незначительного отсева аномальных измерений была необходимость обучения модели по набору данных, максимально приближенному к реальному для оценки ее качества.

Для использования существующих библиотек работы с временными рядами необходимо, чтобы ряд был полный – отсутствовали пропуски и был постоянный временной шаг. При этом периодичность измерений может варьироваться в пределах нескольких дней. По этой причине исходный временной ряд был преобразован в ряд с постоянным шагом. Отсутствующие единичные значения заполнялись методом линейной интерполяции.

Прогнозирование временного ряда методами машинного обучения может проводиться различными способами:

1. Классическими методами (линейная регрессия, ансамблевые методы, градиентный бустинг и прочие);
2. Моделями скользящего среднего, авторегрессии (ARIMA, SARIMA и д.р.).

При использовании классических методов машинного обучения выделяют три вида стратегии построения прогноза:

1. Рекурсивная;
2. Прямая;
3. Гибридная.

При рекурсивной стратегии построения прогноза выбирается одна модель и на основании исходных данных строится прогноз на один временной шаг. Затем результат прогноза вносится в исходные данные как новое значение временного ряда. На основании нового набора данных модель обучается вновь и строится новый прогноз. Количество итераций будет равно длительности прогноза в шагах прогнозирования. При такой стратегии на каждом шаге накапливается ошибка. При этом шаги прогнозирования согласованы между собой.

При прямой стратегии прогнозирования на основании исходных данных строится несколько моделей, каждая из которых предсказывает значение временного ряда на определенное количество шагов вперед. Реализация прямой стратегии позволяет избежать накопления ошибки на каждом шаге. При этом результаты прогнозирования на разных шагах могут быть не согласованны, что недопустимо для ряда задач.

Гибридная стратегия объединяет рекурсивную и прямую стратегию. Такой подход позволяет избежать накопления ошибки и несогласованности результатов прогноза.

В данной работе применялась рекурсивная стратегия прогнозирования. Шаг прогноза составил 10 дней. Так как требовалось предсказать уровень подземных вод – число с точностью два знака после запятой, решалась задача регрессии. В работе использовались следующие алгоритмы машинного обучения:

1. Линейная регрессия;
2. Решающее дерево;
3. Ансамбли (случайный лес);
4. Градиентный бустинг.

Существует несколько библиотек, позволяющих на практике реализовать градиентный бустинг. В данной работе использовались библиотеки Catboost и LGBN. Для моделей градиентного бустинга и случайного леса использовались два варианта настройки:

1. С параметрами по умолчанию;
2. С лучшими параметрами, полученными по результатам кроссвалидации.

Для подбора оптимальных параметров и оценки точности модели регрессии используют метрики: средняя квадратичная ошибка, средняя абсолютная ошибка, максимальная ошибка и т.д. В данной работе использовалась метрика RMSE – корень квадратный из средней квадратичной ошибки. Данная метрика позволяет оценить точность прогноза в случае, когда прогнозные значения могут быть больше или меньше измеренных. При этом RMSE имеет ту же размерность, что и исходные данные.

При построении модели исходные данные мониторинга разбивались на обучающую, тестовую и валидационную выборки[4]. Обучающая выборка составила 75 % от общего набора данных и примерно равна 25 годам наблюдений. Тестовая выборка составила 15 % от общего набора данных, что равняется 6,5 годам наблюдений. Валидационная выборка равнялась 6 % от исходного набора данных и 2 годам наблюдений. Длина валидационной выборки выбрана из расчета, что будет составлять 2 цикла сезонных изменений уровня подземных вод. В таком случае можно будет оценить способна ли модель предсказать наличие сезонных колебаний – межени и паводка. Важной особенностью прогноза временных рядов с помощью методов машинного обучения является необходимость хронологического разделения выборок. В таком случае данные не перемешиваются и сохраняется последовательность: все элементы обучающей выборки предшествуют всем элементам тестовой и все элементы тестовой предшествуют всем элементам валидационной.

Целевым признаком в моделях являлся уровень подземных вод в метрах. На основании анализа исходных данных и существующих представлений о режиме подземных вод города Москвы для моделей были созданы следующие обучающие признаки: месяц, измерения за прошедшие пять лет и скользящее среднее за прошедший месяц.

Подбор параметров моделей проводился по результатам кроссвалидации для моделей, обученных по обучающей выборке. Валидация проводилась по моделям, полученным на этапе кроссвалидации и обученным по обучающей и валидационной выборке. Прогноз проводился моделями, полученными на этапе кроссвалидации и обученными по полному набору данных (обучающая, тестовая и валидационная выборки).

В работе использовались следующие библиотеки программирования: pandas, matplotlib, statsmodels, sklearn, datetime, catboost, lightgbm. Использовался язык программирования Python.

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам работы для каждой скважины было получено 8 моделей. Из 8 моделей выбирались три, показавшие лучшие значения на этапе валидации. Среднее значение RMSE для 14 скважин по трем лучшим моделям составил 0,33 (Таблица 1). Точность прогноза зависела от амплитуды колебаний уровня подземных вод в скважине. Для оценки точности модели в зависимости от ампли-

туды колебаний использовалось отношение RMSE к амплитуде колебаний на тестовой выборке. RMSE в среднем составил 35 % от амплитуды колебаний уровня грунтовых вод на тестовой выборке за период с марта 2023 по декабрь 2024. Исключение составила скважина №3 с отношением RMSE/амплитуда 90%. Такая низкая точность вызвана изменением динамики подземных вод и резким ростом амплитуды колебаний в последние годы.

Линейная регрессия показала противоречивые результаты. На части скважин она показала высокую точность (рис.1). На других скважинах прогноз линейной регрессии начинал резко накапливать ошибку и точность падала с каждым шагом. Вероятно, использование прямой или гибридной стратегий прогноза позволит избавиться от данной проблемы. Прогноз моделями ансамблей и решающих деревьев так же требовал внимания. В некоторых случаях прогноз «вырождался» в тренд. Наилучшие результаты показали модели градиентного бустинга (Catboost и LGBN) (рис.2).

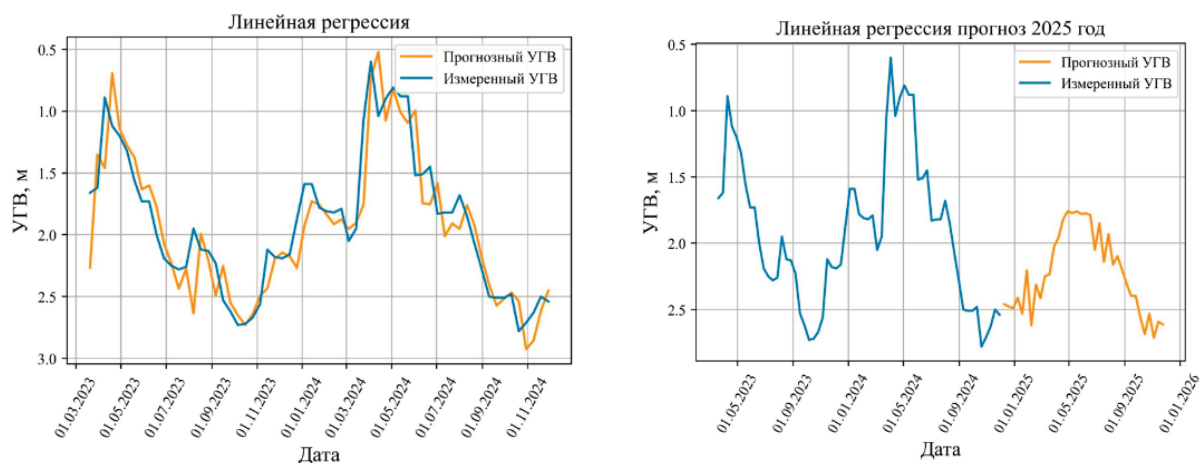


Рис. 1. Результаты валидации (лев.) и прогноза (прав.) модели линейной регрессии

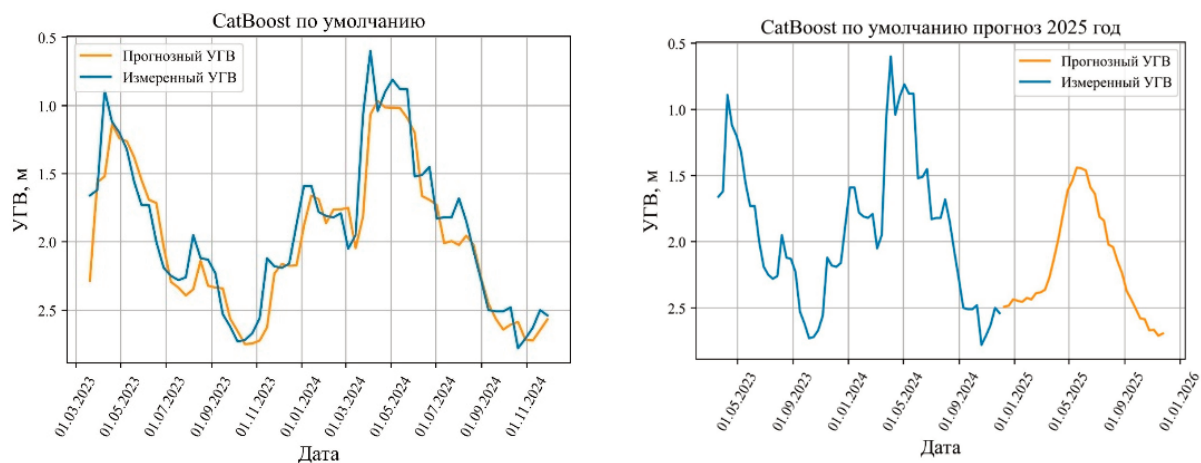


Рис. 2. Результаты валидации (лев.) и прогноза (прав.) градиентного бустинга

На основании полученных моделей был построен прогноз на один год с временным шагом 10 дней (рис. 1 и 2). При прогнозировании период одного года значимая часть моделей смогла спрогнозировать характерную динамику уровня подземных вод – наличие паводка и межени. Прогнозы, полученные таким способом, требуют детального анализа. Как указано выше, прогнозы моделей могут уходить в «тренд» и в «резонанс».

Результаты работы показали различия в точности прогнозов различных моделей применительно к фактическим данным мониторинга и позволили выделить наиболее перспективный метод для дальнейших исследований – градиентный бустинг. При этом желательно использовать несколько моделей прогноза, так как в зависимости от исходных данных точность моделей может изменяться.

Точность моделей по результатам валидации

| № Скважины | RMSE | Амплитуда, м | RMSE / амплитуда |
|------------|------|--------------|------------------|
| 1 | 0,19 | 0,64 | 0,29 |
| 2 | 0,43 | 2,01 | 0,21 |
| 3 | 0,28 | 0,31 | 0,9 |
| 4 | 0,58 | 2,18 | 0,26 |
| 5 | 0,24 | 1,6 | 0,15 |
| 6 | 0,16 | 0,33 | 0,49 |
| 7 | 0,64 | 1,91 | 0,34 |
| 8 | 0,10 | 0,45 | 0,21 |
| 9 | 0,17 | 0,38 | 0,45 |
| 10 | 0,15 | 0,94 | 0,16 |
| 11 | 0,24 | 0,92 | 0,26 |
| 12 | 0,33 | 0,66 | 0,5 |
| 13 | 0,17 | 0,6 | 0,28 |
| 14 | 0,87 | 2,89 | 0,3 |

Использование нескольких моделей позволяет выбрать модель, описывающую исходный процесс наиболее корректно для поставленной задачи. Прогноз временных рядов позволяет оценить изменения уровня подземных вод для различных целей: заполнение отсутствующих значений в режимных наблюдениях, оценка изменения гидрогеологических, инженерно-геологических условий и развития геоэкологических процессов.

Дальнейшим продолжением данной работы являются три основных направления: валидация прогнозов полученных на конец 2024 года по поступающим данным; реализация прямой и гибридной стратегии прогнозирования; создание и анализ дополнительных признаков (например, по метеоданным), для оценки их влияния на уровень грунтовых вод.

Литература

1. Жидков Р.Ю., Абакумова Н.В., Ракутина Н.Н. и др. Оценка точности и достоверности инженерно-геологической модели на основе принципов машинного обучения // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, 2023, №6, с. 4-15.
2. Информационный отчет по выполнению государственного задания ГПБУ «Мосэкомониторинг» на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов за 4 квартал 2023 года по разделам: Часть 1, Часть 2 раздел 5, Часть 2 раздел 8, Часть 2, раздел 9. Под редакцией Егорова Ф.Б. – М, 2023
3. Итоговый отчет: «Работы по выполнению инструментальных наблюдений на пунктах наблюдательной сети в рамках ведения мониторинга геологических процессов в городе Москве» АО «Центральное ПГО» - М, 2018
4. Rademan D., Marcou G. A parametric investigation of the train-test ratio for machine learning algorithms in structural mechanics applications // *Conference: ECCOMAS*, 2024.
5. Joshi A., Raman B., Mohan C. K. Application of a new machine learning model to improve earthquake ground motion predictions // *Natural Hazards* (2024) 120:729–753
6. Liu Y. Machine Learning in Geology: Challenges and Prospects // *Highlights in Science, Engineering and Technology. Volume 44* (2023)

СЕКЦИЯ 3. ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ПОВЕДЕНИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

КАМЕНОЛОМНИ НОВОЙ МОСКВЫ И ИХ РОЛЬ В ТЕХНОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ МАССИВОВ ГРУНТОВ

Н.В. Абакумова¹, Е.Р. Романова^{2,3,4}

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1
E-mail: abakumova.nv@mail.ru

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. 101000, Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2.

³ НИУ МГСУ, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

⁴ ГБУ «Мосгоргеотрест», 123040, г. Москва, Ленинградский пр-кт, д.11.
E-mail: romanova.elizaveta.r@yandex.ru

1 июля 2012 г. произошло присоединение к г. Москве 148 тыс. гектаров новых территорий с образованием двух административных округов, получивших название «Новая Москва». В связи с перспективой градостроительного развития возникла необходимость в комплексной оценке компонентов инженерно-геологических условий Новой Москвы и разработке единой крупномасштабной геолого-картографической основы города. Обновленный геологический атлас будет включать карту распространения опасных геологических процессов, в т.ч. карста и суффозии [1]. На исследуемой территории выявлен ряд поверхностных проявлений этих процессов, однако остается актуальным вопрос о генезисе подземных полостей.

В геологическом строении территории Новой Москвы на разведанную в инженерно-геологических целях глубину принимают участие отложения каменноугольной, юрской, меловой и четвертичной систем. Крупные речные долины прорезают насквозь отложения юрской и меловой систем. В таких местах на трещиноватых карбонатных породах залегают дисперсные грунты четвертичного возраста, что создает благоприятные условия для развития процессов карста и суффозии с последующим образованием характерных форм рельефа.

Для картирования пораженных локальными понижениями рельефа участков была разработана методика автоматизированного выявления замкнутых понижений в рельефе по данным дистанционного зондирования Земли (цифровой модели рельефа, построенной по данным лидарной съемки 2022 г., с разрешением модели 0,2 м), заключающаяся в выполнении следующих операций:

1. сглаживание исходного растра (инструмент Resampling filter в программе SAGA GIS), что позволяет избавиться от аномальных значений абсолютных отметок;
2. попиксельное вычитание из «сглаженного» растра исходного, в результате чего убранные на предыдущем шаге понижения принимают положительные значения;
3. автоматизированная оцифровка участков, фильтрация которых повысила абсолютные отметки на 0,3 м и более (возможен выбор любого порогового значения).

В результате на опытном участке площадью 4 км² в районе Щербинка (Новомосковский административный округ) было выявлено 11 434 полигона различной формы. Были оцифрованы участки, которые включают в себя сточные и бессточные понижения рельефа. Так как воронка по сути является бессточной формой рельефа, то на интересующих участках были построены горизонтали рельефа с высотой сечения рельефа 0,1 м. Выделены только замкнутые изолинии, которые были агрегированы в полигоны. В результате было получено 2 619 локальных понижений рельефа различной формы.

В качестве критериев для сужения выборки были выбраны площадь полигонов и коэффициент округлости Коха, вычисленный в программе QGIS по формуле:

$$K = \frac{4\pi S}{P^2},$$

где S – площадь полигона, P – его периметр.

Данный параметр является отношением теоретической площади круга, вычисленной через измеренный в геоинформационной системе (ГИС) периметр полигона, к его фактической площади, так же вычисленной при помощи ГИС. Чем ближе этот показатель к единице, тем более круглым является полигон.

Оставшиеся 1 203 воронки с коэффициентом Коха не менее 0,4 и площадью от 0,7 до 101,0 м² были верифицированы во время серии полевых выездов в весенний и осенний периоды. Вместе с этим на участках с высокой плотностью воронок были обнаружены следы древней добычи камня – обработанные блоки известняков и редкие входы в каменоломни.

Действительно, близкое к поверхности залегание пластов «подольского мрамора», как называли доломитизированные известняки подольского горизонта московского яруса среднего карбона [2, 3], создало благоприятные условия и для добычи камня, которая наиболее активно производилась на исследуемой территории с конца XVIII по начало XX вв. как открытым (приломы, ломки, рвы, карьеры, ямы), так и закрытым (каменоломни) способами. Сведения о наиболее поздних разработках камня датируются 1930-ми гг. [4].

Подольские известняки добывались, в первую очередь, в качестве строительного материала для возведения цокольных этажей, из них прямо на месте могли производить ступени, капители, подоконники. В более редких случаях известняк использовали в качестве облицовочного камня. Во второй половине XIX в. камень применялся как декоративный элемент архитектуры [3]. Однако большая часть добываемых объемов захоранивалась под землей в виде бутового камня, шла на производство извести.

В ходе полевых выездов также было установлено, что карстово-суффозионные провалы и обрушенная кровля подземных горных выработок (на примере Сьяновских каменоломен, городской округ Домодедово Московской области) имеют схожий облик на дневной поверхности (рис. 1).



Рис. 1. Провалообразные понижения в рельефе карстового генезиса над Кунгурской пещерой около д. Филипповка, Пермский край (слева) (фото Е.Р. Романовой), и техногенного, д. Старосьяново, городской округ Домодедово (справа) (фото Д.Г. Богданова)

Размеры каменоломен определяются мощностью добываемого пласта, которая может составлять от 0,9 м до 2,5 м и более. Соответственно, объемы искусственных подземных полостей существенно превышают объемы естественных пещер на территории Москвы и Московской области и могут измеряться сотнями и тысячами кубических метров, поэтому представляют еще большую опасность для строительства. Стоит отметить, что искусственными выработками часто вскрываются и естественные карстовые полости. Например, в феврале 2020 г. в Сьянах А.М. Пожидаевым была обнаружена субгоризонтальная двухуровневая пещера суммарной протяженностью ходов более 190 м (средняя ширина ходов не более 1 м, средняя высота – около 0,5 м), частично заполненная четвер-

тичным дисперсным материалом, получившая название «Подмосковная» и ставшая самой крупной карстовой пещерой на территории Московской области [5].

На территории Новой Москвы подземные горные выработки вскрыты и изучены в долинах рек Десны, Пахры и Мочи и имеют суммарную протяженность ходов от 20 до 13 400 м. В таблице 1 представлены наиболее детально изученные каменоломни, но ими не ограничиваются все известные разработки камня, также возможны обширные продолжения многих из них [7].

Наличие крупных искусственных пустот в массивах грунтов приводит к их техногенной трансформации, оказывая влияние на все компоненты инженерно-геологических условий территории.

Геоморфологические условия

Продолжительное существование каменоломни вблизи поверхности приводит к формированию характерного сильно расчлененного рельефа. Испещренные воронками (рис. 2), образовавшимися в результате обвала кровли выработок или суффозионного просачивания дисперсных грунтов в подземные полости, участки имеют локальное расположение, ограниченное контурами каменоломни. В некоторых случаях воронки ложатся на одну линию, наследуя расположение обвалившегося штока.

Четко выражены в рельефе идущие от реки, по которой сплавлялась готовая продукция, точильные рвы, с которых начиналась разработка каменоломен. Точильный ров – канавообразная поверхностная горная выработка, созданная в период разработок каменоломен для доступа к порталу (основного входа в систему штоков), расположенная часто в основании, но нередко и в середине склона, в зависимости от залегания промышленного пласта известняка [6]. Ширина точильного рва зависит от мощности добываемого слоя, его глубины.

| <i>Таблица 1</i> | | | |
|---|-------------------------|-------------------------------------|---|
| Наиболее изученные подземные горные выработки на территории Новой Москвы | | | |
| Название | Протяжённость, м | Источник данных (спелеоклуб) | Примечания |
| Еринская гора | 518 | «Чёрное солнце», «Летучая мышь» | Возможны обширные продолжения |
| Рыбинские | 2385 | «Летучая мышь», Парфёнов О. | Возможны продолжения |
| Девятская (Силикаты) | 13400 | «Перово», Парфёнов А. | В объёмах известной части площадь рудного поля порядка 40 га, возможны обширные продолжения |
| Алхимовские | 432 | «Летучая мышь» | В непосредственной близости новая дорога |
| Богородская (Ватутинки) | 394 | «Перово» | Информация о больших объёмах добычи |
| Солнечная (Лубянка) | 2109 +184 | РОСИ, «Чёрное солнце» | Встречались ошибочные 4,5 км |
| Гагаринская | 20 | «Чёрное солнце» | Штрек оканчивается забоем |

Гидрогеологические условия также претерпевают изменения – каменоломни становятся приёмником поверхностных вод с последующим формированием подземных водотоков и небольших водоемов, пересыхающих только в особенно засушливые годы. Активизируется формирование натечных карстовых форм, «пещерного жемчуга».

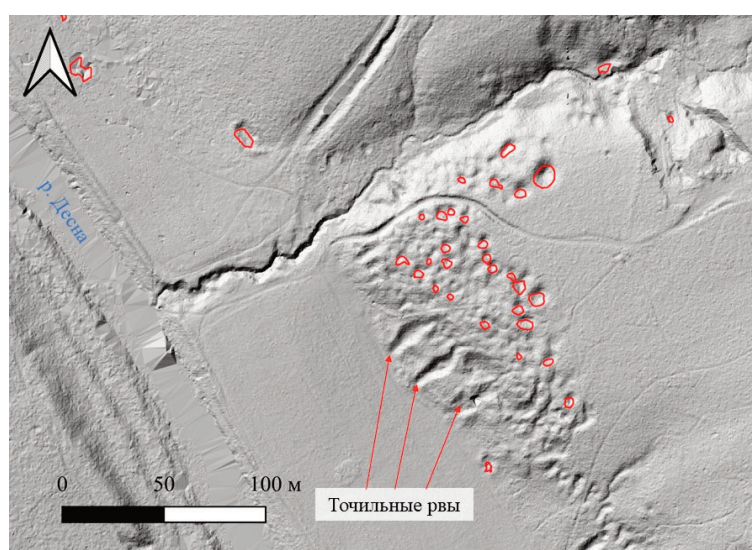
Инженерно-геологические процессы

Сам процесс проходки каменоломен приводит к разуплотнению прилегающих к полостям грунтов, повышению их трещиноватости с последующим выветриванием и разрушением стен. Длительное существование каменоломен в заброшенном виде приводит к развитию гравитационных

процессов – от потолков способны отделяться целые пласты известняков. Крепи, поддерживающие отдельные фрагменты пород, со временем подвергаются гниению и более не способны удерживать большой вес. Обрушение кровли штреков или целых залов приводит поступлению в полости вышележащего дисперсного материала с формированием под землей песчаных или глиняных конусов, а на поверхности – воронок или рвов.

К **специфическим грунтам** в каменоломнях можно отнести субтерральные техногенные отложения. Наибольший интерес представляют содержащие артефакты грунты культурного слоя, которые могут отражать технологические особенности добычи камня в тот или иной исторический промежуток.

Температура в каменоломне круглый год колеблется в интервале от 4 до 10 градусов, создавая благоприятную среду для зимовки и ночного пребывания рукокрылых. Однако в привходовой части в зимний период грунты подвержены промерзанию и морозному выветриванию. Холодный воздух, поступая с поверхности в каменоломню, стелется по полу, а инфильтрующиеся сквозь вышележащую толщу осадки постепенно формируют ледяные сталагмиты. При высокой влажности возможно образование таких форм инея, как «игольчатый» и «лепестковый» лед. Грунты с отрицательной температурой и льды в некоторых каменоломнях сохраняются вплоть середины апреля.



 Идентифицированные воронки

Рис. 2. Расположение провальных воронок, образовавшихся над кам. Еринская Гора, и точильных рвов по результатам обработки лидарной съемки

Активное хозяйственное освоение Подмосковья, в т.ч. территории, впоследствии вошедшей в состав Новой Москвы, привело к исчезновению множества заброшенных каменоломен. Входы и точильные рвы, поверхностные проявления обвалов крыши каменоломен в виде воронок или даже провальных рвов были засыпаны, застроены. Входы в некоторые каменоломни обвалились сами и затерялись в естественном ландшафте. Некоторые из них исчезли в ходе современной карьерной разработки известняка в промышленных масштабах. Часть выработок до сих не выявлена и не нанесена на геологические карты. Всё вышеперечисленное может приводить к недооценке сложности инженерно-геологических условий при проведении изысканий.

Авторы выражают благодарность руководителю спелеоклуба «Перово» Барашкову А.С. за ценные советы и содействие в изучении каменоломен.

Литература

1. Жидков Р.Ю., Романова Е.Р., Абакумова Н.В., Рекун В.С., Лесников Г.А. Применение данных дистанционного зондирования Земли для идентификации опасных геологических процессов на территории Новой Москвы // *Инженерная геология*. 2023. Т. 18, № 4. С. 18–37.
2. Махлина М.Х., Алексеев А.С., Горева Н.В. и др. *Средний карбон Московской синеклизы (южная часть) (в двух томах). Том 1. Стратиграфия*. Москва: Палеонтологический институт РАН, 2005. 244 с.

3. Викторов А.М., Звягинцев Л.И. Белый камень Подмосковья. М.: Недра, 1989. 118 с.
4. Сохин М.Ю., Долотов Ю.А. Спелестологическая изученность бассейна реки Пахры (Московская область). Часть 1: Верхнепахринский и Подольский спелестологические районы // Спелеология и спелестология: сборник материалов конференции. 2016. № 7. С. 253-274.
5. Неходцев В.А., Гаршин Д.И., Пожидаев А.М. Строение и история развития пещеры Подмосковной // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2021. № 5. С. 109-123.
6. Головин С.Е., Булатов А.С., Сохин М.Ю. История вскрышных работ в Подмосковье (1970-90 годы), практика поиска и вскрытия подземных полостей // Спелестологический Ежегодник РОССИ 1999. М.: РОССИ-РОСС, 1999.
7. Долотов Ю.А., Парфенов А.А. Подземные горные выработки на территории Новой Москвы // Геоэкологические проблемы Новой Москвы. М.: Медиа-ПРЕСС, 2013. С. 47-52, 96-107.

МАССИВЫ ГРАНИТОИДОВ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЯ, И ПРОЦЕССЫ В НИХ ПРОТЕКАЮЩИЕ

О.С. Барыкина, О.В. Зеркаль, Е.Н. Самарин, А.П. Пензев, П.Н. Новиков

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1
E-mail: barykinaos@my.msu.ru

В геологическом строении северо-восточного Забайкалья принимают участие разновозрастные осадочные, вулканогенные и интрузивные образования, среди которых наиболее широко распространены массивы гранитоидов. Здесь установлены геологические образования всех систем – от архея до голоцена включительно. Среди них площадь распространения осадочных пород, за исключением рыхлых отложений четвертичного возраста, незначительна и в целом не превышает 15 – 20% [3]. Рассматриваемая территория находится в северо-восточной части крупного гранитоидного батолита (Баргузино-Витимский массив), формировавшегося в несколько фаз [2]. Ангаро-Витимский гранитоидный ареал-плутон представленный гранитоидами конкудеро-мамаканского комплекса ($\gamma C_{2-3}k_1$) имеет изотопный возраст (определен U-Pb методом по циркону) за пределами изучаемой территории (от 301 ± 2 Ма до 298 ± 6 Ма) [4]. Подавляющая часть поля ареал-плутона сложена гранитами биотитовыми, светло-серыми, розовыми, средне- до крупнокристаллических, в меньшей мере порфиоровидными (рис. 1). В порфиоровидных разностях вкрапленники представлены микроклином, редко – плагиоклазом. Размер вкрапленников, занимающих до 15-30 % от объема породы, достигает 1-4 см. Средний состав породы представляется следующим образом: микроклин - 25-37 %, плагиоклаз (олигоклаз) - 30-45 %, кварц - 25 %, биотит - 3-5 %.

Рассматриваемый район характеризуется высокой сейсмической активностью (9 баллов). Сложная история геологического развития района оказала большое влияние на формирование сети разломов, образовавших в кайнозое рифтовую структуру. Наиболее активные тектонические движения приурочены к зоне сочленения Перевального (левый взбросо-сдвиг) и Ангараканского (левый сдвиг) разломов. На основе анализа результатов исследования строительства различных сооружений, связанных с подрезкой склонов в пределах Байкальской рифтовой зоны разрывные нарушения по внутреннему строению можно подразделить на несколько типов. В поле раздвиговых напряжений можно выделить следующие тектонические зоны, сложенные [1]:

- 1) сильновыветрелыми до состояния песка, дресвы, щебня и реже глины водопроницаемыми породами;
- 2) умеренно выветрелыми и катаклазированными до дресвяно-щебнисто-глыбового состояния полупроницаемыми породами;
- 3) слабыветрелыми и сильнотрещиноватыми с наличием полостей, полупроницаемыми породами.

Важнейшим событием в геологической истории Забайкалья было четвертичное оледенение, которое носило горно-долинный характер [3]. Характерной особенностью региона является интенсивное развитие процессов выветривания, при которых массивы гранитоидов распадаются сразу на дресву и песок, не давая промежуточных продуктов разрушения – глыб и щебня. Суровость климата, высота и расчлененность рельефа, пестрота состава горных пород и их трещиноватость, вертикальная и горизонтальная подвижность блоков земной коры обусловили интенсивное развитие процессов древнего и современного выветривания, что привело к формированию разнообразной по составу и строению линейной коры выветривания. При исследовании было выделено пять типов:

- 1) граниты со слабой тектонической трещиноватостью, но с плотной сетью трещин отдельностей криогенного происхождения, на вид монолитные, устойчивые в массиве, в сухом состоянии легко разрушаются под динамической нагрузкой на дресву, щебень, песок с пылью;
- 2) граниты трещиноватые, слабо разрушенные до состояния щебня, в меньшей степени дресвы, песка и глины;
- 3) граниты, разрушенные до состояния дресвы, умеренно дезинтегрированные местами до песка и глины, каолинизированные, менее ожелезненные;



Рис. 1. Граниты биотитовые, светло-серые, среднекристаллические

4) граниты сильно выветрелые, осложненные милонитами и катаклазитами, с гнездами каолина, ожелезнения, с пестрой текстурой;

5) граниты, полностью разрушенные до состояния каолиновой глины с зернами кварца, со слоистой текстурой, фон коричневатого-красный со светло-розовыми включениями.

Вместе с тем, необходимо отметить, что выделенные зоны характеризуют не столько зону выветривания, для которой не типичны милониты и катаклазиты, сколько зону тектонического меланжа, для которого новообразования, в т.ч. высокотемпературные, более характерны.

Рассматриваемая территория представляет собой сильно деформированный блок земной коры с разнообразными по кинематическому типу тектоническими нарушениями. Формирование разломно-блоковой структуры этого блока происходило под воздействием сдвиговых и сдвиго-раздвиговых региональных напряжений. В связи с этим, трещиноватость пород в целом очень велика, что существенно снижает прочность пород в массиве. Анализ трещиноватости показывает (рис. 2), что преобладающая часть трещин имеет падение, близкое к вертикальному, и в основном параллельна направлениям главных тектонических разломов – северо-восточного и северо-западного простирания.

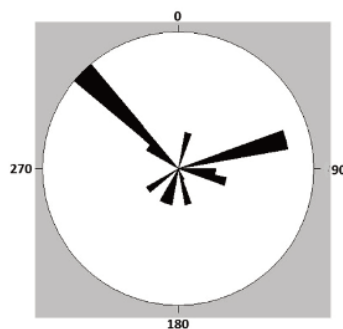


Рис. 2. Диаграмма трещиноватости с наиболее значимыми системами трещин

В районе Северо-Муйского хребта в массивах гранитоидов выделяется до десяти систем трещин, 70% которых крутопадающие и около 30% пологопадающие. Наиболее развиты трещины СВВ и ЗСЗ простирания. Они имеют значительную длину как по простиранию, так и по падению; угол падения их близок к вертикальному (79-80°). Вдоль бортов долин по ним часто идет процесс отседания блоков пород высотой до 15 м. Большое распространение имеют крутопадающие трещины скола субмеридионального и субширотного простираний, а также пологопадающие трещины на-



Рис. 3. Поверхность стенок трещин ЗСЗ простирания - притертая, трещина заполнена глиной трения, видны зеркала скольжения

двигового (взбросо-надвигового) типа и трещины межслоевого скольжения, сопровождаемые маломощными зонами брекчий. Плоскости трещин скола обычно ровные, протяженные, несут следы притертости и зеркала скольжения (рис. 3). Трещины отрыва имеют ломанную линию разрыва пород и меняют пространственную ориентировку как по падению, так и по простиранию. Стенки их обычно шероховатые. Ширина трещин колеблется от 1 мм до 0,2 м, 40-50% трещин выполнены древесным материалом или глиной трения.

Перевальный разлом представляет собой левый взбросо-сдвиг с падением сместителя в юго-западном направлении. Таким образом, система трещин наибольшей интенсивности имеет элементы залегания, соответствующие элементам залегания сместителя Перевального разлома.

Более пологие трещины с углами падения $67-72^\circ$, по-видимому, соответствует элементам залегания сместителя Ангараканского разлома. В ряде случаев зоны тектонических нарушений представлены не отдельными трещинами, а достаточно широкими зонами дробления (до нескольких метров), в пределах которых массивы гранитов являются разрушенными до дресвы и разнозернистого песка (рис. 4).

Генетические особенности массивов гранитоидов определяют их физико-механические свойства и поведение в зонах разломов.

Гранитоиды представляют собой розовато-серые мелко- и среднезернистые породы иногда с отчетливой гнейсовидной полосчатой текстурой, обуславливающей анизотропию их физико-механических свойств. Гнейсовидная текстура, обусловленная линейным расположением минералов, прежде всего слюды, снижает устойчивость пород в массиве, особенно в зоне выветривания. Линейные текстуры создают условия для развития пологопадающих пластовых трещин, сообщающих породе плитчатую отдельность. Массивы гранитоидов многократно подвергались тектоническим воздействиям, что отразилось на развитии разнообразных систем трещин. В образцах, вне зон трещиноватости и выветривания, массивы гранитоидов характеризуются высокой механической прочностью.

Трещиноватость массивов гранитоидов в верхней части разреза достигает 4,5% [5]. В зоне выветривания трещины обычно расширены и нередко достигают ширины 0,3 – 0,5 и даже 1 м, глубиной до нескольких метров. Трещины преимущественно открытые. Прочностные свойства в образцах и скорости выветривания в большей степени зависят от структуры и минералогического состава пород, чем от их возраста. Наиболее крепкими являются мелкокристаллические разновидности гранитов, светлоокрашенные, наиболее слабые – крупнокристаллические, порфировидные. Выветривание гранитов происходит сравнительно быстро. При разрушении их образуются россыпи крупных обломков более или менее сглаженной формы. В отдельных случаях гранитоиды разрушаются сразу на дресву и песок. Мощность элювия обычно 1,5 – 2 м, но местами достигает 4 – 5 м и более.

Выводы. В геологическом отношении рассматриваемая территория располагается в пределах Ангаро-Витимского ареал-плутона, слагаемого массивами гранитоидов. Регион характеризуется высокой



Рис. 4. Зона дробления, заполненная дезинтегрированными до дресвы гранитами

сейсмичностью и активными тектоническими движениями, приведшими к формированию крупных разрывных нарушений с приуроченными к ним зонами повышенной трещиноватости. Наибольшим распространением, помимо трещин отдельности, пользуются крутопадающие трещины северо-восточного и северо-западного простирания, соответствующие направлению основных дизъюнктивов. По таким ослабленным зонам происходит активное выветривание. Характерной особенностью региона является интенсивное развитие процессов выветривания, при которых массивы гранитогнейсов распадаются сразу на дресву и песок, не давая промежуточных продуктов разрушения – глыб и щебня. В розово-серых гранитах, за счет более высокого содержания кварца изменение пород идет больше по линии дезинтеграции, чем по линии изменения химического состава. Процессы изменения пород в приповерхностной зоне приводят к ряду негативных изменений свойств (разуплотнению, снижению прочности, повышению деформируемости). Изучение и прогноз развития процессов выветривания необходим при проектировании и эксплуатации сооружений, оценке устойчивости склонов, прогнозе развития геологических и инженерно-геологических процессов.

Литература

1. *Второй Северомуйский тоннель Восточно-Сибирской железной дороги. Отчетная техническая документация по инженерным изысканиям. Инженерно-геологические изыскания. Геологические и гидрогеологические условия строительства тоннеля (Этап №1).* - ООО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «ЛЕНМЕТРОГИПРОТРАНС»», 2018
2. *Зайцев П.Ф. и др. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Бодайбинская. Лист О-49-XXXVI. Объяснительная записка.* – М.: Мингео СССР, 1979
3. *Инженерная геология СССР. В 8-ми томах. Том 3. Восточная Сибирь. Издательство Московского университета, М., 1977, 657 с.*
4. *Митрофанова Н.Н., Болдырев В.И., Коробейников Н.К., Митрофанов Г.Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-49-Киренск. Объяснительная записка.* - СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, 2012
5. *Солоненко В.П. Очерки по инженерной геологии Восточной Сибири. Иркут. кн. изд-во, Иркутск. 1960. 86 с.*

УСТРОЙСТВО СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОПОЛЗНЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА ВОРОБЬЕВЫХ ГОРАХ В ГОРОДЕ МОСКВА

В.И. Батурин, А.А. Шиманов, Ф.Б. Егоров

Государственное природоохранное бюджетное учреждение «Мосэкомониторинг»,
119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, д.11, стр.1
E-mail: v.j.baturin@gmail.com, inferit90@mail.ru, EgorovFB@eco.mos.ru

Введение

Мировой опыта проведения геотехнического мониторинга показывает важность его проведения для изучения активности оползневых процессов на склонах и подготовки рекомендаций по выбору мероприятий инженерной защиты. Подчеркивается фундаментальная роль мониторинга в понимании комплексного действия всех факторов оползневой активности, и оценки их влияния на устойчивость склона для установления пороговых значений. Данные мониторинга являются основой для контроля и управления рисками, раннего предупреждения и, при необходимости, принятия управляющих решений.

На данный момент все большую роль играют технологии получения данных измерений в режиме реального времени [4, 5, 8]. Также развиваются комплексные методы прогнозирования оползневой активности на базе геотехнических расчетов, в том числе с применением машинного обучения [1, 6, 7]. В таком случае говорят о коэффициенте устойчивости склона и величинах, характеризующих устойчивость.

Данная работа посвящена опыту создания высокоточной автоматизированной системы мониторинга оползневой активности склона Воробьевы горы в Москве. Целью работы является оценка полученного опыта создания современной системы мониторинга и применимости данного опыта к задаче прогнозирования развития оползневого процесса.

Объект и методика исследования

Объект исследования расположен на склоне р. Москвы - участок от ул. Косыгина, где он граничит с флювиогляциальной равниной, до русла реки Москвы.

В связи с тем, что участок расположен в пределах трех геоморфологических элементов - водораздельной флювиогляциальной равнины, русла р. Москвы и оползневого склона, геологическое строение участка представлено для каждого элемента отдельно.

Флювиогляциальная равнина граничит со склоном Воробьевых гор на юге, западе и востоке исследуемого участка (вдоль ул. Косыгина). Территория характеризуется субгоризонтальным залеганием слоев.

В геологическом строении флювиогляциальной равнины до максимальной глубины 111,0 м принимают участие: техногенные грунты (t_{QIV}), водноледниковые флювиогляциальные отложения (f_{QII}), ледниковые моренные отложения (g_{QII}), коренные отложения меловой системы (K_1), отложения верхнего и среднего отделов юрской системы, представленные волжским (J_{3v}), оксфордским (J_{3ox}), келловейским (J_{3k}) и бат-келловейским ($J_{2+3bt-k}$) ярусами, верхне- и среднекаменноугольные отложения (C_3-C_2).

Геоморфологическое строение склона осложнено развитием оползневых процессов. На склоне развиты три уровня оползневых террас (верхняя, средняя и нижняя), характеризующиеся сложным строением. Каждая из террас сложена несколькими оползневыми телами. Оползневые террасы верхнего и среднего уровней осложнены мелкими оползнями.

В геологическом строении русла реки Москвы, по мимо прочего, принимают участие современные аллювиальные отложения (a_{QIV}).

На оползневом склоне Воробьевы горы в 2021 году организована система инструментального мониторинга. Данная система включает в себя следующие подсистемы:

- мониторинг поверхностных смещений;
- мониторинг глубинных деформаций;

- мониторинг грунтовых вод и порового давления;
- геотехническое моделирование.

Мониторинг поверхностных смещений

Маршрутные обследования

Маршрутные обследования проводятся с целью получения косвенных показателей развития оползневых процессов. К таким проявлениям относят характерные изменения рельефа, деформации грунтового массива и сооружений. Также в рамках маршрутных исследований оцениваются прочие факторы – строительные и земляные работы, замачивание склона и пр. Наблюдения проводятся дважды в год – весной после снеготаяния и осенью в период активного выпадения атмосферных осадков. Время проведения маршрутных исследований выбирается с учетом обеспечения максимальной видимости: отсутствие снежного покрова, густой травянистой растительности и т.д. В маршрутах фиксируются проявления оползневых процессов, боковой и овражной эрозии, плоскостного смыва, осыпей, затопления, суффозии, карста и заболачивания. Фиксируются трещины, проседания в грунте, признаки деформаций зданий и сооружений, техногенное воздействие. В рамках маршрутных исследований производится описание точек наблюдения, фотофиксация.

Геодезические измерения

Мониторинг поверхностных смещений проводится геодезическими методами один раз в год на всей площади склона, что позволяет выделить наиболее активные участки горизонтальных и вертикальных деформаций поверхности и проследить многолетнюю динамику перемещений приповерхностных грунтов. Для определения плановых координат деформационных реперов относительно пунктов планово-высотного обоснования прокладываются полигонометрические ходы 2 разряда. Для определения высот деформационных реперов от пунктов планово-высотного обоснования прокладываются нивелирные ходы III класса.

Мониторинг глубинных деформаций

Глубинные деформации фиксируются методом скважинной инклинометрии в специально оборудованных скважинах. Скважины, предназначенные для инклинометрических измерений, оборудованы обсадными трубами, имеющими канавки для движения и фиксации инклинометра в определенной плоскости. Кроме того, скважины имеют глубину, позволяющую вскрыть и заглубиться в толщу каменноугольных известняков. Таким образом, забой скважины принимается как неподвижный. Перед началом цикла измерений выполняется определение координат устья скважины, азимута канавки и проводится спиралеметрическое измерение для определения спиральности по всей глубине скважины. Скважины для измерения глубинных деформаций располагаются по 3-4 на профиль: в верхней, средней и нижней частях склона. Профили инклинометрических скважин закладываются в местах вероятных смещений в массиве грунтов. Инклинометрические измерения в скважинах проводятся ручным способом и с помощью автоматических датчиков.

При ручном измерении инклинометр опускается на забой скважины и поднимается с шагом замера 0,5 м. В результате фиксируются деформации по всей глубине скважины. Измерения проводятся с частотой, прописанной в программе мониторинга, составляющей, как правило, 1 замер за 1-2 месяца. При необходимости частота замеров может изменяться. При автоматическом измерении в скважину устанавливается коса из нескольких инклинометров на определенных глубинах. Глубины установки инклинометров соответствуют глубинам вероятных оползневых смещений и выбираются при анализе результатов бурения для каждой конкретной скважины. При таком режиме испытаний измерения происходят несколько раз в день в заранее выбранных интервалах глубин.

Мониторинг грунтовых вод и порового давления

Для измерения уровня грунтовых вод и порового давления в массиве грунтов оборудована сеть наблюдательных гидрогеологических скважин. Фильтры гидрогеологических скважин размещены в пределах надъяорского водоносного комплекса.

Измерение уровня грунтовых вод производится в двух режимах: ручном и автоматическом. Измерения в ручном режиме производятся при помощи электроуровнемера с частотой примерно 1

раз в 10 дней. Измерения в автоматическом режиме производятся датчиками, установленными в скважинах ниже уровня подземных вод. При автоматических измерениях уровень грунтовых вод фиксируется несколько раз в день. Результаты измерений либо передаются на сервер, либо записываются в память датчика и считываются в ручном режиме. Результаты измерений уровня подземных вод заносятся в базу данных.

Поровое давление измеряется в наблюдательных гидрогеологических скважинах, оборудованных автоматическими датчиками измерения порового давления, установленными ниже забоя скважины. Установка датчика порового давления происходит при бурении скважины. Датчик вдавливается в забой примерно на 0,5 м без последующей возможности его извлечения. Глубина скважины принимается из расчета, что датчик порового давления будет установлен в основном деформирующемся горизонте оползневого массива – в юрских глинах. Измерение порового давления происходит несколько раз в день и записывается в базу данных.

Геотехническое моделирование

На основании 10 геологических профилей было построено 10 предельно равновесных моделей в программном комплексе Slide 2d и 10 конечно-разностных моделей в программном комплексе RS 2. Трехмерная модель объединяет всю имеющуюся информацию о геологических границах участка с другой степенью детальности. Трехмерная модель построена Midas.

Результаты исследований и их обсуждение

Комплексная система мониторинга оползневого склона показала свою эффективность. По результатам анализа данных, полученных в рамках подсистемы мониторинга поверхностных смещений, был выделен участок повышенных многолетних скоростей смещений - территория между СК «Воробьевы горы» и метромостом, включая, участок эскалаторной галереи. Скорости приповерхностных деформаций соответствуют среднемноголетним значениям. Смещения грунтов в приповерхностной зоне в 2023 году составили до 35 мм в плане и 35 мм по высоте, при этом значения смещений большинства грунтовых реперов не превысили точность измерений.

Подсистема мониторинга глубинных деформаций дала понимание о скоростях смещения в массиве грунтов. Максимальные грунтовые смещения составили 9,0 мм за 3 года и наблюдались на уровне юрских глин (в интервале 68-83м в верхней части склона). Среднее смещение в грунтовом массиве за период наблюдения с июля 2022 составило 0,32 мм. Наибольшая скорость смещения в грунтовом массиве за последний год составила 3,1 мм/год. Средняя скорость смещение в грунтовом массиве за последний год составила 0,6 мм/год. Таким образом, в соответствии с классификацией оползневой активности зарегистрированные скорости глубинных деформаций относятся к экстремально медленным (СП 420.1325800.2018).

Подсистема мониторинга грунтовых вод и порового давления позволила осуществлять непрерывный мониторинг резких скачков порового давления, предшествующих началу смещения оползня. Снижение оползневой устойчивости вследствие избыточного переувлажнения склона приходится на период с максимальными уровнями грунтовых вод (преимущественно с февраля по июнь).

Подсистема геотехнического моделирования позволила сделать ряд выводов, о состоянии склона Воробьевых гор. Расчетная глубина захвата оползня достигает 100 м, что не противоречит имеющимся данным о геологическом строении массива грунтов [2, 3]. По результатам расчета коэффициента устойчивости склона, большая часть склона характеризуется пониженной оползневой устойчивостью. Отдельные участки находятся в состоянии, близком к динамическому равновесию. Наименее устойчивыми являются участки склона в районе центра Химической физики РАН и участком между строительной площадкой спортивного комплекса и метромостом. Имеющиеся геотехнические модели могут быть использованы для предварительных расчетов допустимых нагрузок на склон и разработки противооползневых мероприятий. На данный момент продолжается верификация модели по результатам наблюдений.

Система инструментального мониторинга позволяет достоверно оценить состояние оползневого склона Воробьевы горы. Главным достоинством данной системы является комплексность и непрерывность сбора данных в режиме реального времени. Система позволяет накапливать данные для оценки и реагирования на изменение устойчивости склона с точностью до дней. Геотехнические

модели в рамках данной системы позволяют оценить устойчивость склона как на данный момент и делать прогнозы с учетом изменяющихся факторов природного и техногенного генезиса.

Данный подход может считаться универсальным на склонах, сложенных дисперсными грунтами.

Литература

1. *Зеркаль О.В., Фоменко И.К., Самарин Е.Н. Вероятностный подход при моделировании устойчивости склонов: реализация и особенности // Геоэкология, инженерная гидрогеология, геоэкология, 2023, №6, с.26-38*
2. *Кропоткин М.П. Природа крупных оползней Москвы и Подмосковья // Инженерная геология 2016. 1. Стр. 4-13.*
3. *Кропоткин М.П. Оценка оползневой угрозы для метрополитана Воробьевых гор в Москве// Инженерная геология 2016. 3. Стр. 6-15.*
4. *Chaulya S. K., Mishra P. K., Kumar N., et al. Landslide monitoring and prediction system using geosensors and wireless sensor network // Discover Geoscience. 2024 2(1)*
5. *Garcia I. A. B., Macciotta R., Rodriguez J., et al. Introduction and testing of a cost effective GNSS system for landslide monitoring // Natural Hazards. 2024. 120:8521–8549*
6. *Gong W., Tian S., Wang L., et al. Interval prediction of landslide displacement with dual-output least squares support vector machine and particle swarm optimization algorithms. // Acta Geotechnica. 2022. 17:4013–4031*
7. *Halter T., Lehmann P., Wicki A., et al. Optimising landslide initiation modelling with high-resolution saturation prediction based on soil moisture monitoring data // Landslides. 2024.*
8. *Rawat P. S., Barthwal A. LANDSLIDE MONITOR: a real-time landslide monitoring system // Environmental Earth Sciences. 2024. 83(8)*

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЯ ОПАСНОСТИ ДЛЯ МОРСКИХ ЛАГУННЫХ БЕРЕГОВ В ЗОНАХ ПОДВОДНЫХ КАНЬОНОВ НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ КАВКАЗА

Е.В. Дзагания¹, Л.М. Дзагания², В.И. Крыленко³

^{1,2} ООО «ГК «Инжзащита», 354055, г. Сочи, ул. Пластунская, 202

E-mail: krylenka@gmail.com, dzagluba@gmail.com

³ Институт водных проблем Российской академии наук, 119991, г. Москва, ул. Губкина, д. 3

E-mail: krylenkovasiliy@gmail.com

Побережья морей и океанов, расположенные в благоприятных климатических поясах, являются самыми густонаселенными территориями Земли. В то же время, близость крупных водоемов несет с собой дополнительные риски опасных природных воздействий, таких как, шторма, смерчи, цунами, нагонов, приводящих к отступанию берегов, особенно в зонах развития подводных каньонов.

Для предотвращения разрушения селитебных территорий на морских берегах требуются долгосрочные прогнозы возможных негативных воздействий на здания и сооружения, а также на окружающую среду.

В работах [5, 6 и др.] авторами была предложена методика оценки воздействия опасных процессов на морские берега на примере Черноморского побережья Кавказа. В результате анализа аварийной ситуации, сложившейся на побережье Имеретинской низменности в междуречье Мзымта – Псоу, авторы пришли к выводу, что оценка обобщенного показателя опасности для лагунных берегов для Черноморских берегов Кавказа была заниженной. Это потребовало уточнения показателя опасности для лагунных берегов Черноморского побережья Кавказа и пересмотра значимости геологического (палеогеографического) фактора и фактора воздействия подводных каньонов.

С учетом палеогеографического аспекта развития голоценовых террас Черноморского побережья Кавказа, геологического строения и литологического состава [1-4, 7, 10], на лагунных берегах в зонах развития подводных каньонов имеются предпосылки для масштабных подвижек обводненных рыхлых грунтовых масс. Такие участки имеют протяженность вдоль берега от сотен метров до нескольких километров.

Археологические данные о находках на шельфе Черного моря развалин древнего города Диоскурии, находившегося на голоценовой террасе протяженностью около 14 км, в районе современного города Сухуми в междуречье Гумисты и Келасури, свидетельствуют об отступании береговой линии в сторону суши в последние 1,5-2 тыс. лет [3]. Темпы смещения береговой линии могли меняться в различные фазы колебаний уровня моря и при существенном изменении климатических условий.

В конце XIX века исследователи обнаружили, что фрагменты и целые массивы древней кладки шли от берега и обрисовывали под водой прямоугольную территорию, защищенную с четырех сторон крепостными стенами (либо оградительными портовыми молами). Только части северной стены крепости сохранились на современном берегу. Отдельные археологические находки относятся к периоду ранней бронзы (около 3,5 тыс. лет до н.э.). Строительство сооружений города Диоскуриада в районе современного города Сухуми приурочено исследователями ко времени максимума «фанагорийской» регрессии [1-3, 7, 10].

Позднее на месте Диоскуриады римляне возвели город-порт Севастополис, который также был разрушен морем. Портовых сооружений сохранились на дне Сухумского залива на расстоянии до 450 м от береговой линии на глубинах 5-8 м [1].

Лагунные берега исследуемого региона (междуречья Херота – Мзымта - Псоу, Бзыбь - Мюссера, Хипста - Аапста, Гумиста - Келасури, Кодор - Очамчира, Ингури - Риони - Супса) выполняются мощной толщей (более 50 м) оторфованных глин лагунно-болотного происхождения, подстилаемых на глубинах 5-6 м ниже современного уровня моря горизонтом торфов, которые прослеживаются на расстоянии не менее 100 м от береговой линии в сторону моря [1-4]. Результаты геологических и радиоуглеродных исследований свидетельствуют о формировании очертаний морских террас в период 3,7-4,2 тыс. лет назад, когда уровень моря превышал современный на 2-3 м [10]. В этой

фазе образовались наиболее древние обнаруженные генерации сформированных волнением моря вдольбереговых валов. Около 3,0-2,7 тыс. лет назад произошло понижение уровня Черного моря примерно на 10 м, началось изменение растительного покрова, появление широколиственных и смешанных лесов (бук, граб, дуб, ольха, сосна) и заселение осушенных территорий [3]. Ландшафт существенно изменился. Геологические исследования показывают, что в пределах сформировавшихся ранее лагун илистые отложения повсеместно перекрываются относительно мощным покровом делювиальных суглинков, в котором обнаружены культурные слои I тыс. до н. э. [3].

Заключительная (нимфейская) фаза трансгрессии Черного моря охватывает последние 1.5-2 тыс. лет [1-4, 7, 10]. Повышение уровня моря привело к активизации абразии уже освоенных людьми берегов и к разрушению сооружений.

Современные спутниковые снимки позволяют увидеть, что в настоящее время шельф вдоль лагунных берегов Черноморского побережья Кавказа испещрен каньонами и вдольбереговыми бровками срыва (рис. 1). Это свидетельствует о неустойчивости мощных толщ из рыхлых осадочных пород, сползающих по крутым подводным откосам континентального склона. Более точную картину изменений рельефа дна и определения наиболее опасных участков могут дать повторные батиметрические промеры, водолазные обследования и дистанционные подводные съемки.



Рис. 1. Шельф Черного моря вдоль лагунных берегов междуречья Гумиста – Келасури, город Сухуми, в прошлом Диоскуриада (модифицированный автором спутниковый снимок Google Earth 2023 г.)

Обрушение массива донного грунта вместе с оградительным северным молом строящегося порта было зафиксировано в междуречье Мзымта-Псоу во время шторма в декабре 2009 г. В считанные минуты ушел под воду фрагмент мола протяженностью около 300 м в центральной части Имеретинского порта к юго-востоку от устья реки Мзымта в зоне воздействия подводных каньонов Мзымтинской группы (Новый, Кальмар, Мзымтинский). Исходя из знаний о литодинамических условиях морского побережья в междуречье Мзымта–Псоу, специалисты до начала строительства предупреждали о нецелесообразности возведения портов в зоне воздействия подводных каньонов на морских лагунных берегах, с огромной толщиной легко размываемых грунтов в береговой зоне (рис.2), [8].

Основаниями для неблагоприятного прогноза были опасность разрушения проектируемого сооружения и негативное влияние на прилегающие курортные пляжи города Сочи (ныне федерального городского образования Сириус). Спустя 15 лет после начала строительства можно утверждать, что эти негативные прогнозы реализовались. Среднегодовая скорость отступления берегов к юго-востоку от построенного порта оценивается в 1,7 м/год, при этом после сильных штормов суша на отдельных участках может отступать сразу на 10-15 м [8, 9]. Уже более полутора десятка лет тратятся огромные средства на попытки сохранить набережную и курортные пляжи к югу от порта. Имеретинский грузовой порт в устье реки Мзымта так и не был введен в эксплуатацию как грузовой, северная часть его акватории используется для стоянки яхт, южная часть закрыта, как аварийная.

В методике определения показателей опасности для Черноморских берегов Кавказа [5, 6] авторами была предложена типизация берегов, основанная на геоморфологических, биоклиматических

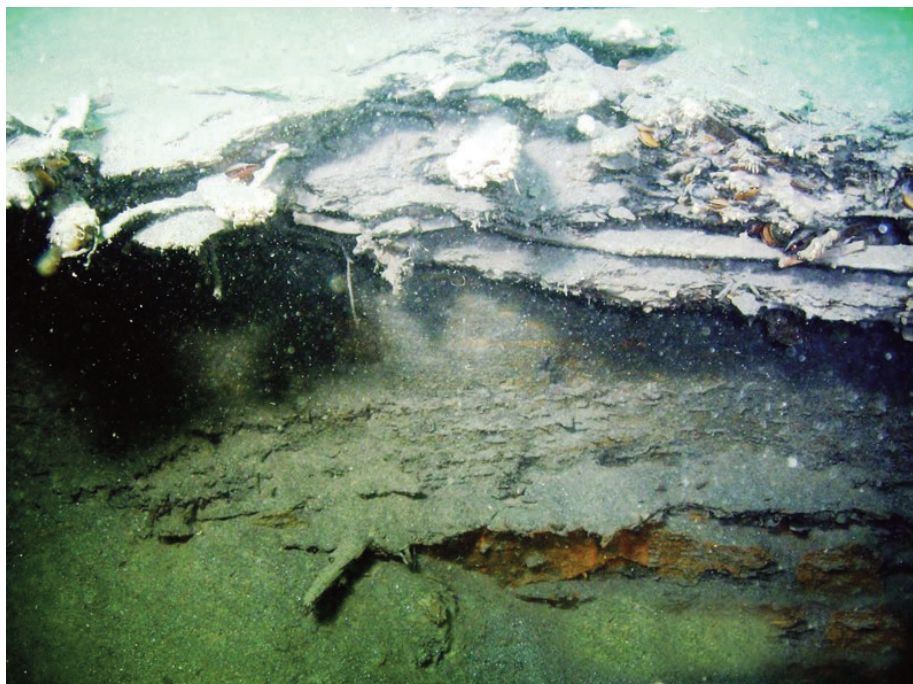


Рис. 2. Бровка подводного Мзымтинского каньона, сложенная рыхлыми осадочными грунтами на лагунном берегу в междуречье Мзымта - Псоу. Глубина 15 м. Фото Пономарева А.А., 2007 г.

Таблица 1

Расчет обобщенных показателей опасности с градацией берегов по типу поступления наносов для Черноморского побережья Кавказа

| № п.п. | Наименование показателя (фактора) | Оценка показателя по типу берега (нумерация расшифрована выше) | | | | | |
|--------|---|--|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | По угрозе разрушения берега: | | | | | | |
| 1.1 | Сейсмический (вулканы, цунами, землетрясения) | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,20 | 0,20 |
| 1.2 | Штормовой (волнения, течения) | 0,20 | 0,50 | 0,40 | 0,50 | 0,3 | 0,30 |
| 1.3 | Ураганы, смерчи | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 |
| 1.4 | Наличие пляжей, бухт (естественной защиты берега) | 0,20 | 0,90 | 0,50 | 0,10 | 0,80 | 0,80 |
| 1.5 | Наличие техногенной защиты берега (оградительные молы, буны, бермы, искусственные острова и т.п.) | 0,60 | 0,40 | 0,40 | 0,90 | 0,10 | 0,40 |
| 1.6 | Наличие или отсутствие поступления наносов из рек | 0,20 | 0,70 | 0,50 | 0,10 | 0,60 | 0,90 |
| 1.7 | Воздействие подводных каньонов | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,60 | 0,01 | 0,20 |
| 1.8 | По уклонам дна | 0,30 | 0,60 | 0,60 | 0,30 | 0,30 | 0,50 |
| 1.9 | По устойчивости и прочности пород (сооружений) | 0,3 | 0,40 | 0,40 | 0,70 | 0,01 | 0,40 |
| 1.10 | По фактору колебаний уровня воды | 0,30 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,30 | 0,0 |
| 1.11 | По фактору селевых потоков | 0,80 | 0,50 | 0,50 | 0,70 | 1,00 | 0,3 |
| 1.12 | По фактору оползней (в том числе подводных), обвалов, осыпей | 0,3 | 0,50 | 0,40 | 0,40 | 0,3 | 1,0 |
| 2 | Факторы загрязнения и техногенного воздействия | | | | | | |
| 2.1 | По наличию опасных техногенных объектов на суше | 0,70 | 0,7 | 0,80 | 0,50 | 0,60 | 0,40 |
| 2.2 | По наличию опасных техногенных объектов в акватории | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,40 | 0,60 | 0,40 |
| 2.3 | По антропогенной нагрузке (чем выше плотность населения и застройка, тем ниже показатель) | 0,40 | 0,60 | 0,60 | 0,30 | 0,30 | 0,80 |
| | Обобщенный показатель | 0,37 | 0,54 | 0,50 | 0,37 | 0,21 | 0,00 |

ческих и антропогенных факторах. Для комплексной оценки степени опасности берегов были использованы частные, обобщенные и комплексные показатели для различных типов морских берегов Черноморского побережья Кавказа [5, 6]. Типы берега выделены по признаку поступления и перемещения наносов: абразионные (1), аккумулятивные (2), абразионно-аккумулятивные (3), техногенные (4), лагунные (5), устьевые (6). В таблице 1 представлен откорректированный расчет обобщенных показателей с учетом изменений частных показателей для лагунных берегов (среднее геометрическое значений частных показателей для каждого типа берега в отдельности).

Частные показатели оценки воздействия принимались по рабочей шкале, значения которой меняются от 0 до 1 (где диапазон значений от 0 до 0,37 означает неприемлемый уровень опасности, 1 – максимально безопасный).

С учетом вышесказанного, изменены в худшую сторону (понижены) следующие частные показатели для лагунных берегов: штормовой, по наличию надежных защитных сооружений, по уклонам дна, устойчивости к размыву грунтовых масс береговых склонов, по воздействию подводных каньонов, по фактору оползней (включая подводные).

С учетом протяженности каждого типа берега и соответствующих обобщенных показателей для перечня интересующих участков, включающих разные типы берегов, могут быть выполнены расчеты комплексных показателей. Затем производится ранжирование по этим величинам (от меньшего значения к большему) и определяются наиболее опасные участки морских берегов с наименьшими комплексными показателями.

Неприемлемый уровень опасности имеют устьевые участки морского берега, которые являются зоной затопления. Также ниже допустимого уровня ($0,21 < 0,37$) оцениваются возможности освоения для морских лагунных берегов Черноморского побережья Кавказа в зоне развития подводных каньонов.

Надежный способ инженерной защиты для морских лагунных берегов Черноморского побережья Кавказа в зонах воздействия подводных каньонов пока не найден, замедляют отступление берегов регулярные отсыпки пляжей [11]. Исходя из высокой экономической и рекреационной значимости, такие берега целесообразно использовать как пляжно-оздоровительные территории и парковые зоны, без жилой и многоэтажной гостиничной застройки и потенциально опасных техногенных объектов в 500-метровой полосе суши от современной береговой линии.

Литература

1. Балабанов И.П. Палеогеографический аспект проблемы создания искусственных пляжей как метода защиты аккумулятивных берегов / И. П. Балабанов // Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки. – 2013. – Т. 18, № 1(17). – С. 31-37. – EDN UMDYDR.
2. Балабанов И.П. Палеогеографические предпосылки формирования современных природных условий и долгосрочный прогноз развития голоценовых террас Черноморского побережья Кавказа. Москва: Дальнаука, 2009. – 350 с. – ISBN 978-5-8044-0995-2. – EDN QKILGX.
3. Балабанов И.П., Поротов А.В., Горлов Ю.В., Кайтамба М.Д. Эволюция Сухумского побережья в позднем голоцене / Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2004. № 2. С. 55.
4. Балабанов И.П., Измайлов Я.А. Изменение уровня и гидрохимического режимов Черного и Азовского морей за последние 20 тысяч лет / Водные ресурсы. 1988. № 6. С. 54.
5. Дзаганя Е.В. Методика оценки воздействия опасных процессов на морские берега на примере Черноморского побережья Кавказа от мыса Панагия до реки Псоу / Е. В. Дзаганя, Л. М. Дзаганя // Сергеевские чтения. Региональная инженерная геология и геоэкология : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Дербент, 28–29 марта 2024 года. – Москва: Геоинфо, 2024. – С. 51-54. – EDN MNQCSB.
6. Дзаганя Е.В. Методика оценки мультиопасных явлений в прибрежных зонах Черноморского побережья Кавказа Выпускная квалификационная работа магистра. Направление 05.04.06 «Экология и природопользование» М., РУДН, 2023.
7. Имеретинская изменчивость. Природно-геологические условия, проблемы освоения / [Балабанов И.П. и др.]; под ред. И.П. Балабанова. – Москва: Недра, 2011. – 281 с. – ISBN 978-5-8365-0388-8. – EDN QKKSHN.

8. *Ponomarev A.A. Aspects in engineering protection of coast in canyon area / Ponomarev A.A., Dzaganiya E.V., Dzaganiya M.Y. ICOE2009 The Third International Conference on Ocean Engineering 1-5 February 2009. Collection of extended abstracts. Editors: Prof. J. Ananta Subramanian, Dr. S. Nallayarasu, Dr. S. A. Sannasiraj. Faculty of Ocean Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai - 600036, India. In: IIT; Madras.*
9. *Пономарев, А.А. Оценка опасных процессов в береговой зоне Имеретинской низменности / А.А. Пономарев, Е.В. Дзагания // Сергеевские чтения. Научное обоснование актуализации нормативных документов инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий, Москва, 23–24 марта 2010 года. Том Выпуск 12. – Москва: Российский университет дружбы народов, 2010. – С. 166-171. – EDN VHAFLZ.*
10. *Поротов А.В., Горлов Ю.В., Балабанов И.П. К палеогеографии Восточного Причерноморья в античную эпоху / А. В. Поротов, [и др.] // Проблемы истории, филологии, культуры. – 2003. – № 13. – С. 197-207. – EDN IAAУMP.*
11. *Сафьянов Г.А., Менишков В.Л., Пешков В.М. Подводные каньоны – их динамика и взаимодействие с береговой зоной океана. Краснодар: Эдарт-принт, 2007. - С. 392.*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПОЛЗНЕВОГО МАССИВА ПРИ СМЕЩЕНИИ

Б.И. Корженевский, Н.В. Коломийцев

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», 127434 г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, корп. 2
E-mail: kolomiytsev@vniigim.ru

Специалисты по экзогенным геологическим процессам нечасто прибегают к изучению физики оползневых процессов на прикладном уровне, из редких крупных работ в этом направлении отметим следующие [1, 12, 19]. Многочисленные расчёты физических характеристик исследуемых экзогенных процессов на «фундаментальном уровне» хорошо работают в средах, близким в идеальном, что в природных условиях характерно только для соляных отложений. Изменение напряжённого состояния горного массива во внутригодовом и многолетнем режимах, его трещиноватость, квазистационарное и динамическое техногенное воздействие и прочие природные и техногенные факторы обуславливают сложности и зачастую невысокую достоверность при расчётах искомых характеристик. Предложенный ниже энергетический подход далеко не панацея, но он позволяет на качественном уровне «уложить на разные чаши весов» факторы, предупреждающие развитие рассматриваемых склоновых процессов, и факторы, определяющие их развитие.

В работе [16] отмечается, что в геодинамическом комплексе противодействуют две категории энергии: статическая энергия внутренних прочностных связей в твёрдых телах и энергия гравитации, стремящаяся разрушить эти связи. Третий вид энергии – активационная энергия тела – энергия необходимая для вывода частицы или более крупного геологического тела из существующего состояния.

Внешняя энергия гравитации по [16] – это энергия упорядоченного движения тела, которое представляет комплексное взаимодействие между собой атомов и молекул. Такими телами могут быть частицы и агрегаты, водный и ветровой потоки и т.д., то есть тела, находящиеся под влиянием гравитации или косвенно зависящие от неё. Взаимодействие между отдельными частицами и телами выражается в форме трения. В целом же внешнюю энергию геодинамического комплекса можно считать единой термодинамической системой.

«Внутренняя электромагнитная энергия компонентов геодинамического комплекса складывается из сил притяжения и отталкивания между атомами и молекулами. Сила притяжения определяет степень устойчивости пород – сопротивление истиранию и раскалыванию. Силы отталкивания – степень сопротивления упругим и пластическим деформациям. Прочностные структурные связи – энергия, накопленная грунтами за время их седиментации, диагенеза, метаморфизма... Энергия внутренних электромагнитных прочностных связей грунтов противостоит гравитационной энергии масс грунтов, вод, попадающих на поверхность рельефа и проникающих в грунтовую толщу. Энергия внутренних связей равна внешней энергии, необходимой для того, чтобы эти связи разрушить. Это положение является основой энергетического баланса геодинамического комплекса» [12].

Нами внутренняя энергия оценивается как энергия связей грунтовой толщи (геодинамического комплекса), под которой понимается комплексный показатель прочности, вязкости, липкости, сопротивления трению и др., далее $E_{св}$ [4-6]. В общем виде наибольшей $E_{св}$ обладают грунты с ионным типом связей (скальные), наименьшей $E_{св}$ – грунты с молекулярным типом связей – с низкой вязкостью и прочностью (дисперсные). Величина $E_{св}$ определяется условиями осадконакопления, диагенеза и катагенеза и эпигенетическими их трансформациями. Переход из области влияния внутренних энергий устойчивости в область внешней энергии гравитации происходит путём преодоления различных энергетических барьеров. «Энергия, которую следует сообщить частице или геологическому телу для его активации называется энергией активации. Эта энергия обычно получается за счёт действия внешних сил» [13].

Применяемый специалистами термин «энергия рельефа» [9-11], по сути является «мощностью рельефа», что более соответствует физической сущности, так как является отражением работы, затраченной за определённое (геологическое) время для создания современного облика геологического тела [4]. В зависимости от среды, в которой формировалась грунтовая толща, от минерального состава

отложений, от условий диагенеза, затрачивается определённая физическая работа на формирование различных видов связей в грунтовой толще. Соответственно затрачивается работа и на последующую «жизнь» этой толщи. Так же работа затрачивается и на разрушение уже сформировавшихся связей при выветривании. В общем виде мощность рельефа можно представить соотношением [6]:

$$E_e = A_{св}/t_{св} + A_o/t_o - A_b/t_b,$$

где: E_e – полная мощность рельефа; $A_{св}$ – работа, затраченная на установление связей; A_o – работа, затраченная на воздымание объекта на его современную высоту; A_b – работа, затраченная на выветривание; $t_{св}$, t_o и t_b – время, за которое совершалась работа по установлению структурных связей, подъёму геологического тела на современную высоту и выветривание геологического тела соответственно. Из формулы видно, что чем выше $A_{св}$, A_o и t_b и, соответственно, чем ниже A_b , $t_{св}$ и t_o , тем выше мощность рельефа, что в упрощённом виде можно представить так: чем меньше прошло времени от начала формирования осадка и чем выше склоны, тем выше мощность рельефа и наоборот.

С изложенных позиций достаточно просто объяснить ограниченные размеры геологических тел и мощность процессов, в которых участвуют эти тела, энергетической ограниченностью. При увеличении размеров геологического тела вес возрастает быстрее, чем прочность – первое – пропорционально кубу, вторая – квадрату, то есть, по сути, чем меньше размер геологического тела, тем выше его относительная прочность [6]. Для начала перемещения частицы или агрегата вниз по склону необходимо некоторое количество $E_{ак}$. В целом мгновенное состояние геологического тела (агрегата, частицы) можно определить по соотношению $E_{гр}$ и $E_{св}$. Это:

- устойчивое состояние геологического тела при $E_{гр}$ меньше $E_{св}$;
- смещение геологического тела вниз по склону до энергетической ловушки или потенциального барьера при $E_{гр}$ большей, чем $E_{св}$;
- унаследование объектом предшествующего состояния при равенстве $E_{гр}$ и $E_{св}$ [5].

Природные факторы, как и техногенные, могут оказывать двойное влияние на изменение $E_{гр}$ и $E_{св}$ грунтовой толщи – повышать или понижать их в различных соотношениях. Повышение $E_{гр}$ может осуществляться за счёт: а) повышения веса системы (геологического тела), б) за счёт внешних импульсов (волн природного и техногенного генезиса), направление которых совпадают с направлением вектора наиболее энергетически выгодного перемещения геологического тела. Увеличение веса, в нашем случае, чаще всего происходит при попадании дополнительного объёма жидкости в геологическое тело, а в последние десятилетия и при техногенном воздействии. Наряду с механическим повышением веса тела возможно его расчленение на меньшие по размеру объекты вследствие растрескивания грунтовой толщи (возникновение на поверхности полигонов усыхания в жаркую погоду и др.). Положение центра масс возникших объектов в этих случаях относительно потенциального барьера у некоторых повышается, у других понижается, то есть более мелкие объекты будут обладать индивидуальными характеристиками при движении вниз по склону в отличие от ранее существовавшего более крупного массива. Наряду с отмеченными выше природными и техногенными факторами определённую роль в энергетических характеристиках склонов играют внутригодовые и многолетние колебания напряжённого состояния грунтовой толщи. Первые обусловлены ротационным режимом земли [2, 15] и в упрощённом варианте осенью отмечается незначительное увеличение полостного пространства, что в совокупности с сезонными дождевыми осадками вызывает повышение $E_{гр}$ агрегатов и понижение $E_{св}$ вследствие размокания на склоне осенью. Если осенью, в период увеличения полостного пространства осадков выпало мало, вышеперечисленные процессы, способствующие разрушению грунтов существенно менее активны. При сезонном сжатии грунтового массива происходят процессы обратной описанной выше направленности. Многолетние изменения напряжённого состояния определяют, в отличие от внутригодовых циклов, общую тенденцию движения грунтовых агрегатов и частиц на изучаемых объектах.

Существует и глубинная (вертикальная) энергетическая оснащённость склонов. Её определяют постоянно воздействующие природные факторы, и их техногенные аналоги. На основании многолетних режимных наблюдений в дисперсных грунтах Южного берега Крыма (ЮБК) на специально оборудованных кустах реперов, были выделены три, расположенных вертикально одна под другой, подзоны различной энергетической оснащённости [15]. Контактующая с дневной поверхностью подзона аэрации – верхняя часть грунтовой (толщи, подверженная внутригодовым и многолетним

изменениям влажности, обусловленными попаданием в грунты вод атмосферных осадков и снеготаяния. Для ЮБК глубина (мощность) этой подзоны, обычно, не превышает трех метров [15]. Ниже по разрезу располагается подзона ротационной энергетической составляющей. Изменение ее характеристик определяется изменением ротационного режима земли, имеющего сезонную изменчивость. Наиболее энергооснащёнными вследствие изменения ротационного режима Земли, грунты являются в зимне-весенний период, наименее – спустя полгода. Глубина нижней границы этой подзоны местами несколько превышает полтора десятка метров относительно дневной поверхности [15]. Обычно мощность оползней на ЮБК не превышает эту глубину. Исключением является оползни в зонах разрывных нарушений, где глубина захвата грунтов при оползании достигает 35–40 м. Ниже по разрезу, в местах распространения разрывных нарушений, расположена подзона влияния разрывных нарушений. Изменение ее активности как во внутригодовом, так и многолетнем циклах, определяет повышение/понижение энергооснащённости как её самой, так и выше расположенных подзон.

Для различных категорий дисперсных грунтов и инженерно-геологических условий, рассчитанное на основании экспериментальных данных соотношение энергетических вкладов между тектонической, ротационной, экзогенной (аэрационной) составляющей в зависимости от гранулометрического состава грунтов колебалась в пределах 46/50; 30/40; 24/10 процентов соответственно. На участках вне подзон влияния разрывных нарушений, в зависимости от состава грунтов процентный вклад в энергооснащённость исследуемой толщи составлял 20/30; 70/80 в пользу ротационной энергетической составляющей [15].

Литологический состав отложений в значительной степени определяет скорость и дальность смещения оползневого тела [7, 8]. В зависимости от литологического состава грунтов в зоне сдвига, активность оползневого процесса может существенно различаться [3, 14]. При оползневом процессе в дисперсных грунтах достаточно чёткая энергетическая картинка следует в контексте [3] – чем больше разница между пиковой прочностью грунтов и остаточной, тем активнее оползневой процесс. $E_{гр}$ после возникновения поверхности скольжения (уменьшения $E_{св}$) превышает её незначительно, так как лишь незначительно падает прочность, такие же характеристики как вязкость, силы трения и другие остаются близкими к показателям до начала смещения геологического тела. При движении вниз по склону на пути оползня встречаются энергетические ловушки, представленные как природными, так и природно-техногенными морфоэлементами, такими как пологие площадки, подпорные стены и прочие, которые на время, до внесения очередной порции $E_{ак}$ приостанавливают развитие процесса. Конечным пунктом активности оползня является потенциальный барьер – обычно это комплекс корректно выполненных противооползневых мероприятий, останавливающий оползневую эволюцию склона.

Требуется уточнения энергетика «аномально далёкого» оползневого смещения с зоной сдвига в полускальных и скальных грунтах. В литературе встречаются весьма различные интерпретации этого процесса, вплоть до смещения на «воздушной подушке» и на «прослойке из пара», возникшей в результате повышения температуры грунтов и содержащейся в них жидкости до кипения вследствие весьма интенсивного трения грунтов в зоне сдвига [8, 10, 17, 18]. Нами механизм представляется следующим. Активационной энергией ($E_{ак}$) при возникновении таких оползней нередко бывает сейсмическая волна. Происходит разрушение геологического тела на более мелкие блоки, при этом несколько сокращается площадь соприкосновения оползневого тела с подстилающей толщей. С энергетических позиций, исчезают такие компоненты $E_{св}$ как прочность грунтов и их вязкость, немного сокращается сила трения. В итоге превышение $E_{гр}$ над $E_{св}$ в момент надлома скальных и полускальных грунтов могут различаться на порядок, в отличие от дисперсных. Потенциальным барьером для таких оползней нередко случается противоположный борт водотока или долины. Из наиболее известных назовём подпрудные плотины озёр Рица на Кавказе и Сарезского на Памире, а также крутые, расположенные вкост движения геологического тела, и весьма протяжённые пологие морфоэлементы рельефа.

При оползневом процессе в дисперсных грунтах в качестве $E_{ак}$ могут выступать весьма многообразные как природные, так и техногенные факторы. Отметим, что в подавляющем большинстве случаев при активизации таких оползней $E_{гр}$ имеет незначительное превышение над $E_{св}$ и активность (дальность и скорость) смещения невысокая. Оползни проседания и внезапного разжижения по [8] обычно происходят при понижении $E_{св}$, прочие – при комбинированном изменении $E_{св}$ и $E_{гр}$. Для того, чтобы произошло основное смещение по [3], необходимо одновременное воздействие

большого количества факторов, которые повышают $E_{гр}$, понижают $E_{св}$ и способствуют значительному привносу энергии в систему за счёт $E_{ак}$. Оценка с энергетических позиций возможности вторного основного (по 3) смещения в пределах одного геологического тела такое смещение, скорее всего, исключает.

Литература

1. Бандарик Г.К. *Общая теория инженерной (физической) геологии*. М.: Недра, 1981. 256 с.
2. Гарбар Д.И. Две концепции ротационного происхождения регматической сети // *Геотектоника*. 1987. № 1. С. 107–108.
3. Емельянова Е.П. *Основные закономерности оползневых процессов*. М.: Недра, 1972. 308 с.
4. Корженевский Б.И. Зональность энергетического потенциала – основа для прогноза гравитационных процессов в горном регионе / *Методы регионального инженерно-геологического прогнозирования*. М.: Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1989. С. 136–146.
5. Корженевский Б.И. Миграция тяжёлых металлов в речных бассейнах и определяющие её факторы // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. 2018. № 3(155). С. 87–91.
6. Корженевский Б.И. Факторы миграции тяжёлых металлов в водные объекты и на сопредельных территориях // *Международный технико-экономический журнал*. 2019. № 4. С. 38–44.
7. Корженевский Б.И., Борисенко Л.С., Корженевский И.Б., Новик Н.Н. Литологический контроль гравитационных процессов в горном Крыму. // *Бюллетень МОИП. Отдел геологический*. 1989. Т. 64. № 6. С. 98–109.
8. Кюнтцель В.В. *Закономерности оползневого процесса на Европейской территории СССР*. М.: Недра, 1980. 213 с.
9. *Опасные экзогенные процессы* / Под ред. В.И. Осипова. М.: Изд-во ГЕОС, 1999. 289 с.
10. *Оползни и инженерная практика* / Под ред. Э.Б. Эккель. М.: Наука, 1960. 267 с.
11. *Оползни и сели. Том 1*. М.: Изд-во ВИНТИ, 1984. 352 с.
12. Полуниин Г.В. *Экзогенные геодинамические процессы гумидной зоны умеренного климата (физические аспекты экзогенных процессов)*. М.: Наука, 1983. 347 с.
13. Полуниин Г.В. *Динамика и прогноз экзогенных геологических процессов*. М.: Наука, 1989. 232 с.
14. Постоев Г.П. *Предельное состояние массива и деформации грунтов в массиве. Оползни. Карстовые провалы, осадки грунтовых оснований*. СПб.: Изд-во Нестор – История, 2013. 100 с.
15. Селюков Е.И., Корженевский Б.И. Глубинная энергетическая зональность склонов и развитие гравитационных процессов (на примере Южного берега Крыма) // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический*. 1990. Т. 65. № 5. С. 102–107.
16. Уилксон Д., Пайерлс Р., Льюэлин-Смит К., Перкинс Д., Салам А., Эллис Дж., Адаме Дж., Гелл-Ман М. *Фундаментальная структура материи*. М.: Мир, 1984. 312 с.
17. Федоренко В.С. *Тектонические и сейсмические явления и их значение в формировании катастрофических обвалов и оползней в районах Чаткальского и Алтайского горноскладчатых сооружений / Вопросы инженерной геологии и грунтоведения*. М.: Изд-во МГУ, 1968. Вып. 2.
18. Федоренко В.С. *Обвально-оползневые зоны и их связи с глубинными разломами и трансорогенными структурами* // *Инженерная геология*. 1983. № 2. С. 3–14.
19. Шейдеггер А.Е. *Физические аспекты природных катастроф*. М.: Недра, 1981. 232 с.

КАТАСТРОФИЧЕСКАЯ АКТИВИЗАЦИЯ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА НА УЧАСТКЕ АВТОДОРОГИ М-7 «ВОЛГА»

М.М. Кучуков, А.И. Казеев, Н.А. Орлова, Г.П. Постоев

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2
E-mail: opolzen@geoenv.ru

Введение

Проблема проектирования и строительства вблизи и на склоновых массивах актуальна по сей день. Ее решение невозможно без достаточного опыта и некоторого понимания механизма и закономерностей формирования оползневых процессов. Иными словами, одних сил изыскательских организаций, либо проектных организаций или даже их совместного взаимодействия зачастую оказывается недостаточно, – и, эти слова подкреплены реальным опытом, на многих участках федеральных трасс М-7, М-12 и других.

Расширение автомобильной дороги и строительство локального очистного сооружения (ЛОС) на рассматриваемом в данной статье участке автодороги потребовало создание на откосе технологической подъездной дороги для обслуживания объекта. В свою очередь, для строительства подъездной дороги была запроектирована армогрунтовая насыпь на откосе дороги для удержания отсыпаемой террасы. В процессе строительных работ, практически на этапе завершения строительства, на откосе стали проявляться деформации грунтового массива, которые динамично прогрессировали во времени.

Краткая характеристика условий площадки исследования

Стоит отметить, что результаты изысканий и проектирования прошли государственную экспертизу. Однако, все же, необходимо несколько расширить входные данные.

Геоморфологические условия. Участок исследований приурочен к правобережному коренному склону долины реки. Рельеф участка эрозионно-денудационный, техногенный. Абсолютные отметки склона 52,4 м – 145,8 м. Автодорога имеет высотные отметки 78,8–81,1 м на участке исследования [1].

Геологические условия. В геологическом строении площадки строительства принимают участие: техногенные насыпные грунты (tQ_{IV}), современные аллювиальные отложения (aQ_{IV}) поймы, элювиально-делювиальные суглинки (edQ_{I-III}), верхнепермские отложения, представленные глиной красно-коричневой, мергелями, известняками и песчаниками (P_2) [1].

Гидрогеологические условия площадки изысканий на момент проведения буровых работ в пределах изученного разреза до глубины 25.0 м характеризуются присутствием двух водоносных горизонтов: аллювиального горизонта, приуроченного к четвертичным аллювиальным отложениям, а также приуроченного к водоносному неоген-четвертичному терригенному комплексу [1]. Режим подземных вод непостоянный и зависит от времени года. Амплитуда сезонного колебания может составить 0.5–2.0 м от зафиксированной глубины на момент изысканий. Установившийся уровень зафиксирован на глубинах 7.0–8.5 м.

Инженерно-геологические процессы. На исследуемом участке наблюдается развитие склоновых процессов. Высота склона достигает 60–80 м и имеет крутизну до 50°. Склон прорезан балками и оврагами. Кроме того, на участках близкого расположения к дороге М-7, нижняя часть склона подрезана при строительстве дороги, при этом борта подрезанного склона приобретали почти обрывистый вид. Такой характер рельефа создает предпосылки для развития на поверхности коренного склона склоновых процессов [1].

Динамика развития оползневых смещений на участке активизации

В декабре 2022 г. начались деформации на откосе и асфальтовом покрытии краевой части дороги М-7. В ИГЭ РАН обратились строители и проектная организация для выполнения работ по теме: «Анализ механизма развития оползневых деформаций, выполнение инклинометрических измерений для выявления глубины поверхности скольжения оползня, разработка рекомендаций по защитным мероприятиям и мониторингу».

Авторы работы на основе анализа имеющихся материалов и сложившейся ситуации на участке предложили выполнить шпунтовое ограждение в прирусловой части и отсыпать пригружающую

берму с низовой стороны подпорной стены. Однако заказчики работ были решительно против шпунтового ограждения, желая найти альтернативные варианты защиты, в то время как деформации на склоне прогрессировали, достигая 50–200 мм/сут. Отказавшись, из-за сложностей обустройства от шпунтового ограждения, было принято решение убрать часть грунта в головной части зарождающегося оползня и отсыпать пригружающий контрбанкет на нижней берме для замедления деформаций армогрунтовой насыпи. Данные мероприятия сработали и скорости деформаций на склоне снизились (до 3–10 мм/сут.). Однако, отсутствие удерживающего ограждения (шпунта) в прирусловой части сказалось тем, что деформации продолжились на нижней берме – контрбанкете (рис. 1), так как грунты на горизонте уреза реки и ниже на 1.5–2 м сложены слабыми глинистыми водонасыщенными грунтами, которые теряют прочность под быстровозрастающей нагрузкой.

В период с 11 по 20 апреля 2023 г. на участке развития оползневых смещений в створе армогрунтовой насыпи были обустроены 9 инклинометрических скважин для выполнения мониторинга, выявления глубины и динамики развития оползневых смещений. Инклинометрические скважины располагались 3 створами, на трех уровнях: у кромки автодороги, на берме в средней части склона, а также на отсыпанной пригружающей берме ниже армогрунтовой насыпи.

По инклинометрическим скважинам установлена глубина до поверхности скольжения. По скважинам, расположенным в средней части откоса, глубина до поверхности скольжения (ПС) составляет 14–16 м, т.е. расположена на абс. отм. 55–56 м, несколько поднимаясь к краевой части участка активизации до отметок 58.0 м (в районе ЛОС) [1].



Рис. 1. Вид на участок автодороги в апреле (а) и июле (б) 2023 г.



Рис. 2. Оползневые трещины на упорной берме 26.04.2023 г. (а) и работы по созданию шпунтовых стенок, террасированию откоса (б) 02.08.2023 г. [1]

В нижней прирусловой части склона (ниже армогрунтовой насыпи) глубина до поверхности скольжения составляет ориентировочно 9–10 м (абс.отм. 49.0–51.0 м – базис смещения, урез реки на 52.5 м). Массив в данной части испытывает дробление, образование трещин на участке выпора и выхода восходящей части поверхности скольжения (см. рис.2а) возникшего оползневой блока [1].

По результатам мониторинга была установлена глубина до базиса оползня, определены параметры оползневой блока и положение поверхности скольжения по центральному створу в виде окружности радиусом 24 м, в соответствии с механизмом подготовки и развития оползня.

Выполненные расчеты подтвердили, что массив находится в неустойчивом состоянии и для повышения коэффициента запаса устойчивости до требуемых нормативных величин необходимы дополнительные защитные мероприятия в виде свайного удерживающего ростверка и отсыпки контрбанкета на нижней берме, а для удержания самого контрбанкета необходимо устройство шпунтового ограждения, так как продолжавшаяся деформация оползневого массива проявилась в виде выдвинутого острова в русле реки (рис. 2б и 3) [1].



Рис. 3. Космоснимок участка активизации деформаций откоса автомобильной дороги [3]

Полученные результаты

Проведение исследований по изучению механизма развития оползневых смещений, включая выполнение инклинометрического мониторинга и визуального обследования склона, на этапе малых величин смещений, позволили выявить глубины расположения в массиве поверхностей скольжения (ПС) по всем скважинам, расположенным в пределах активного оползневого контура, т.е. в средней части откоса, а также в языковой части оползня (ниже армогрунтовой стенки).

В результате выполнения исследований ИГЭ РАН установлено следующее:

На склоне активно развивается оползневой процесс, проявившийся после сооружения массивной армогрунтовой насыпи на откосе. В ходе обследования были отмечены многочисленные трещины на асфальтовом покрытии существующей автодороги, как поперечные, так и продольные. Было выявлено, что оползневые смещения развиваются максимально активно в средней части откоса под дорогой. Стоит отметить, что после отсыпки упорной бермы с низовой стороны до абс.отм. 60.5 м смещения замедлились. Однако, через некоторое время упорная призма начала активно деформироваться. В связи с этим, было рекомендовано выполнить во фронтальной части упорной бермы шпунтовое ограждение, для предотвращения расползания грунтов упорной бермы, служившей контрбанкетом (пригрузкой) для сформировавшегося оползня.

О механизме формирования оползня. На рассматриваемом участке активизация оползневого процесса произошла в виде образования крупной структуры (ДГС), на участке сооружения армированной насыпи, и её блокового смещения.

Базис блокового смещения склонового массива находится на отметке около 48 м. В соответствии с закономерностями смещения ДГС-блока на данном участке смещается блок по круговой поверхности (в разрезе), радиусом $Z_a = 24$ м. Это подтверждается также данными визуального обследования, с выявлением признаков восходящей поверхности скольжения на откосе насыпной бермы вдоль русла реки [1, 2].

О причинах образования оползня. Рассматриваемый участок характеризуется сложным рельефом и сложными инженерно-геологическими условиями (III категория).

Причинами образования оползня в створе строящейся площадки ЛОС и запроектированной армогрунтовой стенки послужил ряд природно-техногенных факторов. Катастрофический характер развития оползневых деформаций в значительной степени обусловлен особенностями механизма развития блоковой структуры (ДГС-блока) и специфическими грунтовыми условиями на горизонте базиса, что привело к смещениям свыше 10 м.

Наличие слабых водонасыщенных грунтов на горизонте базиса на отметке около 48 м в средней части склона и давление на указанные грунты на горизонте базиса (см. рис. 4) от техногенного

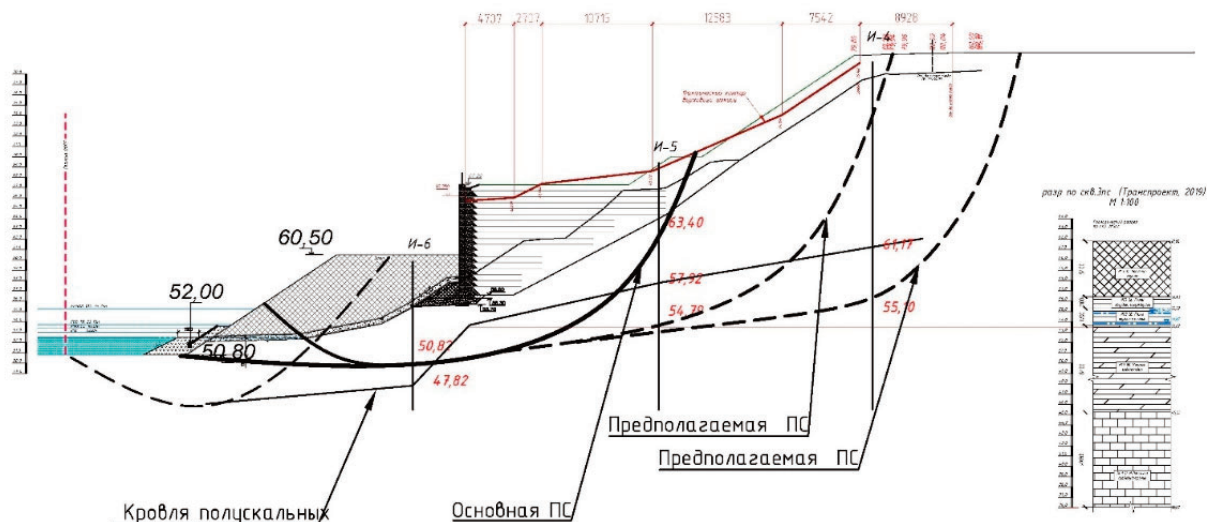


Рис. 4. Схематический разрез по центральному створу участка активизации [1]

грунтового массива создали критическую ситуацию по устойчивости склонового массива. Верхняя граница (трещина закола) располагается на отметке около 72 м. Таким образом, глубина от верхней границы блока до базиса составила 24 м, а протяжённость оползневого блока – около 110 м. Круговая поверхность скольжения блока определилась в соответствии с механизмом подготовки, проявления границ оползневого блока и анализом данных мониторинга [1, 2].

Также в верхней части разреза в прирусловой зоне могут располагаться «слабые» прослои, представленные русловыми отложениями (о чем свидетельствуют активно «расползающиеся» грунты упорной бермы, отсыпанной в нижней части склона до отметок 60,5 м.

Отчасти вклад в формирование оползневых смещений вносит фильтрация подземных вод.

Расчеты устойчивости склона выполнены с использованием программного комплекса GeoStab по четырем сечениям, расположенным в створе активизации оползня.

Согласно полученным результатам расчетов устойчивости склона, для стабилизации оползневых смещений, проявившихся в средней части склона (оползневой очаг), с учетом выявленного механизма развития оползня, необходимо создание пригрузки в виде контрбанкета/контрфорсов, укрепленных шпунтовыми стенками. Однако этих мероприятий недостаточно, для обеспечения требуемого (нормативного) коэффициента запаса общей устойчивости склона, с захватом автодороги (с учетом возможного повышения УГВ и с учетом нагрузки от автотранспорта).

Расчётами получено, что на момент активизации оползня склон находился в предельном состоянии (коэффициенты запаса устойчивости $K_{st}=0.99-1.03$), с учетом уточненной при изысканиях 2023 г. геологической информации.

В связи с этим, было принято решение о создании удерживающего сооружения (свайного ростверка) в средней части откоса для восприятия (компенсации) оползневого давления, а также контрбанкета с низовой стороны. При этом общая и локальная устойчивость склона обеспечивается на требуемом уровне: $K_{st} \geq 1.28$.

Сам контрбанкет был укреплен шпунтовой стенкой (выполненной секционно – для пропуска подземных вод и исключения проявления «барражного» эффекта), а также выполнены берегозащитные мероприятия.

Литература

1. Научно-технический отчет по теме: «Анализ механизма развития оползневых деформаций, расчеты устойчивости склона с учетом проектного очертания и разработка рекомендаций по защитным мероприятиям и мониторингу». ИГЭ РАН, Москва, 2023.
2. Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Особенности расчетов устойчивости склона при образовании нового оползневого блока // Геозкология. 2022. № 5. С. 87-96.
3. <https://yandex.ru/maps/>

ТИПИЗАЦИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ В ДОЛИНЕ Р. МОСКВЫ ПО УСЛОВИЯМ РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

П.В. Новиков, О.В. Зеркаль, Е.Н. Самарин

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1
E-mail: pasha-nov@mail.ru

Долина р. Москвы находится в центральной части Восточно-Европейской платформы, в южной части Московской синеклизы. Оползневые процессы являются одними из широко распространенных процессов в долине р. Москвы и её притоков. Они характеризуются значительным многообразием форм: от крупных оползней скольжения до мелких сплывов и оплывин.

Это означает, что для рационального хозяйственного освоения изучаемой территории необходимо решение вопросов картирования и прогнозирования развития оползневых процессов. Основой для составления прогнозов развития оползней является типизация инженерно-геологических условий с точки зрения особенностей склоновых процессов.

Как известно, строение массивов грунтов, формирующих склоны, в значительной степени определяет механизм и особенности развития оползневых процессов. В связи с тем, что долина р. Москвы находится в центре платформы, особенности развития оползневых процессов во многом определяются стратиграфо-генетическими комплексами, слагающими массивы грунтов, формирующих склоны.

Попытка типизации массивов грунтов, формирующих склоны, в долине р. Москвы была сделана В. Кюнтцелем в своей диссертационной работе. Была сделана попытка выделения нескольких типов массивов грунтов, формирующих склоны. В основу классификации было положено соотношение юрских глинистых отложений и современного эрозионного вреза. Таким образом, В.В. Кюнтцелем рассматривались массивы исключительно с точки зрения глубоких оползней, связанных с юрскими глинами [4].

В настоящее время собран большой массив данных об оползневых процессах в долине р. Москвы. Накопленные материалы позволяют значительно обобщить и уточнить представления о взаимосвязи строения массивов грунтов, формирующих склоны, с развивающимися оползнями, выделить характерные взаимосвязи между геологическими телами, слагающими массивы, и проявлениями оползневых процессов (таблица 1).

Важно отметить, что подобные типизации не учитывают специфических техногенных воздействий (подрезка, пригрузка склонов, вибрационные воздействия и т.п.), поскольку различные их сочетания могут приводить практически к любым механизмам оползневых процессов.

Верхняя часть геологического разреза в долине р. Москвы сложена образованиями каменноугольной, юрской, меловой, неогеновой и четвертичной систем.

Каменноугольные образования представлены отложениями среднего и верхнего отделов. Средний отдел представлен, главным образом, известняками и доломитами мячковского горизонта московского яруса, мощностью до 32-41 м [7]. Глинистые горизонты имеют незначительную мощность и не определяют механическое поведение массивов.

Верхний отдел представлен терригенно-карбонатной толщей гжельского и касимовского ярусов. Толща верхнекаменноугольных отложений представляет собой переслаивание карбонатных (суворовская (C_{3sv}), ратмировская (C_{3rt}), перхуровская (C_{3prh}), измайловская (C_{3izm}), русавкинская (C_{3rs}) свиты) и глинистых (воскресенская (C_{3vs}), неверовская (C_{3nv}), мешчеринская (C_{3msc}), трошковская (C_{3tr}), шелковская свиты (C_{3sch})) образований совокупной мощностью до 90 м [1, 5]. В настоящее время глинистые разности практически повсеместно находятся ниже отметок современных эрозионных врезов, либо в основании пологих низких склонов что исключает возможность формирования оползней под действием естественных факторов в современных условиях.

Следует отметить, что в раннем неоплейстоцене существовали глубокие эрозионные врезы (Татаровская палеодолина и ее притоки), прорезавшие всю толщу верхнекаменноугольных отложений [3]. Глубокие речные долины в сочетании с крутыми склонами создавали благоприятные условия для развития глубоких оползней скольжения, связанных с глинистыми горизонтами

толщи каменноугольных отложений. Авторы допускают развитие таких процессов в геологическом прошлом.

Юрские отложения представлены континентальной толщей батского яруса и морскими образованиями келловей-титонского ярусов. Отложения батского яруса и нижней части келловейского яруса представлены кудиновской свитой (J_2kd) (глины), московской (J_2mr) (пески и глины), алпатьевской толщей (J_2al) (преимущественно пески), мокшинской (J_2mk) (переслаивание песков, глин и алевролитов) толщами, общей мощностью до 29 м. Эти отложения приурочены к участкам развития доюрской палеодолины и залегают на большей части территории значительно ниже современных эрозионных врезов (до 30 м) и не оказывают существенного влияния на развитие оползневых процессов в настоящее время [6]. Тем не менее, авторы допускают возможность развития палеоползней, связанных с этими отложениями, в неоплейстоцене на участках пересечения доюрской палеодолины, Хорошевской и Татаровской палеодолинами.

Отложения верхней части келловейского яруса и верхнеюрские отложения (окфорф-кимеридж-титонского ярусов) представлены песчано-глинистой толщей криушской (J_2kr) и мневниковской (J_3mn) свит, глинистой толщей чулковской (J_{2-3chl}), подмосковной (J_3pm), коломенской (J_3kl), макарьевской (J_2mk) и горкинской (J_3gr) свит, а также песчаной толщей костромской (J_3ks) свиты, суммарной мощностью до 43 м.

Верхнекелловейские и верхнеюрские отложения в долине р. Москвы характеризуются различным залеганием по отношению к отметкам современного эрозионного вреза. Хорошо известны участки, где кровля юрских отложений находится значительно ниже современных эрозионных врезов, приблизительно соответствует уровню современного эрозионного вреза или располагается выше современных эрозионных врезов [4].

Таким образом, залегание глинистых отложений юрской системы и соотношение с положением современного эрозионного вреза создает благоприятные условия для развития глубоких оползней скольжения как в раннем неоплейстоцене, так и в голоцене. На участках залегания глинистой толщи юрского возраста вблизи дневной поверхности, вследствие процессов выветривания и увлажнения, могут возникать мелкие приповерхностные оползни-потоки и сплывы.

Отложения верхнего подъяруса титонского – берриасского ярусов сложены песками с прослоями алевролитов лопатинской (J_3-K_1lp), кунцевской (K_1kn) свитами и люберецкой толщей (K_1lbr), суммарной мощностью до 15 м на участках присклоновых массивов. Нижнемеловые отложения готеривского яруса состоят из алеро-песчаной толщи дяковской (K_1dk), савельевской (K_1sv), гремячевской (K_{1+gr}) свиты и преимущественно глинистой толщи котельниковской свиты (K_1kt). Суммарная мощность отложений порядка 15 м.

Барремский и аптский яруса представлены песчаными толщами икшинской (K_1ik) и волгушинской (K_1vlg) свит, а также песчано-глинистыми толщами бутовской (K_1bt) и ворохобинской свит (K_1vrh) суммарной мощностью до 33 м.

Отложения верхней части титонского яруса, нижнемеловые образования во многих случаях слагают высокие склоны в современной долине р. Москвы. В развитии оползневых процессов наибольшее значение играют горизонты с пониженными прочностными характеристиками, содержащими прослой глины значительной мощности (котельниковская, бутовская, ворохобинская свиты). При образовании глубоких оползней скольжения и комплексных оползней, основные деформации при смещении которых приурочены либо к верхней части среднеюрских глин, либо к верхнеюрским глинам, нижнемеловые образования, как правило, играют пассивную роль, формируя верхнюю часть оползневых блоков. На участках залегания меловой толщи без выраженных горизонтов глин возможно формирование суффозионных оползней и оползней, связанных с гидродинамическим разрушением.

Верхняя часть нижнемеловой толщи (альбский ярус) и верхнемеловые отложения (от сенманского до сантонского ярусов) представляют собой преимущественно песчаную толщу гаврилковской (K_1gv), яхромской (K_2jah), загорской (K_2zg), дмитровской (K_2dm), теньтиковской (K_2tn) свит с алевролитисто-глинистым горизонтом парамоновской свиты (K_1pr). В долине р. Москвы эти отложения залегают только в районе Теплостанской возвышенности, на удалении от современных эрозионных врезов и практически не участвуют в развитии оползневых процессов на рассматриваемой территории.

Отложения неогеновой системы (N) распространены на отдельных участках в южной части долины р. Москвы. Сложены главным образом песками с подчиненными линзами глин, мощностью до 10-15 м [2].

Таблица 1

Типизация оползневых процессов по основному деформируемому горизонту в долине р. Москвы

| Основной деформируемый горизонт | | Тип массива | Механизм оползневого процесса | | | Глубина захвата | Основные факторы развития оползневых процессов |
|---------------------------------|--|-------------|---|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------|---|
| Возраст отложений | Литологическая характеристика | | Скольжения | Течения | Комбинированный | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Каменноугольный | Глинистая и карбонатно-глинистая толща | 1 | Не известны, но могли развиваться в геологическом прошлом | - | - | Глубокие | - |
| Юрский | Глинистая толща | 2 | - | Единичные проявления | - | Поверхностные | Увлажнение подземными и поверхностными водами |
| | | | Широко распространены | - | - | Глубокие | Активная речная эрозия |
| Меловой | Песчаная толща с горизонтами глин | 3а | Единичные проявления | - | Не известны, но возможно развитие | Глубокие | Активная эрозия / увлажнение подземными и поверхностными водами |
| | Песчаная толща | 3б | - | - | Единичные проявления | Как правило, поверхностные | Суффозия, гидродинамическое разрушение |
| Четвертичный | Песчаная толща | 4а | Редкие проявления | - | Единичные проявления | Поверхностные | Активная речная/овражная эрозия |
| Четвертичный | Глинистая толща | 4б | Редкие проявления | - | - | Глубокие и поверхностные | Активная речная/овражная эрозия |
| | | | - | Единичные проявления | - | Поверхностные | Переувлажнение поверхностными водами и атмосферными осадками |
| | Песчано-глинистая толща | 4в | Редкие проявления | - | - | Поверхностные | Активная речная/овражная эрозия |
| | | | - | Широко распространены | Широко распространены | Поверхностные | Переувлажнение поверхностными/подземными водами |
| | | | - | - | Редкие проявления | Поверхностные | Суффозия, гидродинамическое разрушение |

Они приурочены к верхней части склонов и играют пассивную роль в развитии оползневых процессов.

Среди многообразных генетических типов четвертичных отложений в строении массивов грунтов, формирующих склоны, принимают участие моренные, водноледниковые, озерно-ледниковые, делювиальные, аллювиальные и техногенные образования. Водноледниковые и аллювиальные отложения представлены, главным образом, песчаными и супесчаными толщами с подчиненной ролью глинистых отложений. Моренные и озерно-ледниковые отложения представлены преимущественно глинистыми отложениями, а делювиальные и техногенные образования – как правило, сла-

гаются песчано-глинистой толщей. Суммарная мощность четвертичных отложений может достигать 50-60 м. В связи с большим разнообразием происхождения состава четвертичных отложений, в них могут формироваться все основные типы оползней (таблица 1).

В долине р. Москвы развиты оползневые процессы с механизмом скольжения, течения и комбинированным. Характер оползневых процессов тесно взаимосвязан с генезисом и составом отложений (таблица 1). В частности, глубокие оползни скольжения в большинстве своем обусловлены речной эрозией, прорезающей отложения вплоть до юрских глинистых образований. В то же время формирование глубоких оползней скольжения в аллювиальной толще не встречается на рассматриваемой территории. Полученные обобщения могут послужить основой для выделения потенциально опасных районов с точки зрения различных типов и проявлений оползневых процессов.

Литература

1. Алексеев А.С., Баранова Д.В., Кабанов П.Б. и др. *Опорный разрез верхнего карбона Москвы. Статья 1. Литостратиграфия* // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 1998. Т. 73, №2. с. 3-15
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Лист N-37 – Москва. Объяснительная записка // Кузьмин А.Н., Кириков В.П., Лукьянова Н.В., Максимов А.В. и др. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015, 462 с.
3. Кожевников А.В., Кожевникова В.Н., Рыбакова Н.О., Петрова Е.А. *Стратиграфия Подмосковного плейстоцена* // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 1974. Т. 54. с. 103-127
4. Кюнтцель В.В. *Закономерности возникновения и природа оползней, связанных с юрскими отложениями бассейна р. Москвы. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. геол.-минер. наук, М., 1965*
5. Москва: геология и город / Под ред. В.И. Осипова, О.П. Медведева. М.: АО «Московские учебники и Картолитография», 1997. – 400 с.
6. Олферьев А.Г. *Стратиграфия юрских отложений Московской синеклизы. Юрские отложения Русской платформы (сборник научных трудов). Ленинград: Мингео СССР, 1986. – С. 48-61*
7. *Средний карбон Московской синеклизы (южная часть) (в двух томах). Том 1. Стратиграфия* / М.Х. Махлина, А.С. Алексеев, Н.В. Горева и др. М., Палеонтологический институт РАН, 2001, 244 с.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

Г.Б. Поспехов, В.А. Изотова

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 1
99106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2
E-mail: violettaizotova@yandex.ru

Вмешательство человека в литосферу стало сопоставимым с природными геологическими процессами и результатом такого вмешательства стало образование техногенных массивов.

В 2000 году Пашкевич М.А. дала определение техногенному массиву – это геологическая структура, сложенная породой или наносом антропогенного генезиса, отличающаяся по своему составу (химическому, гранулометрическому, бактериологическому) и свойствам (физико-механическим, фильтрационным, сорбционным и пр.) от фоновых пород их вмещающих, форма и размеры которой определяются преимущественно технологическими процессами [5].

Гальперин А.М. с коллегами в монографии 2012 года говорят, что техногенный массив – это искусственно сформированное в природном ландшафте геологическое тело, представленное горными породами, отходами обогащения, золами, шлаками [2].

Современные реалии разработки месторождений полезных ископаемых сопровождаются значительным увеличением объемов образования промышленных отходов, что, в свою очередь, приводит к формированию обширных техногенных массивов.

Эти массивы представляют собой сложные объекты, изучение которых связано с рядом трудностей, включая недостаточную теоретическую и практическую базу. Одной из наиболее важных групп техногенных отходов, привлекающих внимание исследователей, являются гипсосодержащие материалы. Эти материалы обладают уникальными характеристиками (состав, форма зерен, состояние, свойства), которые отличают их от природных грунтов, и именно это делает их изучение особенно актуальным. Однако на сегодняшний день данные техногенные образования остаются недостаточно исследованными в рамках инженерно-геологических изысканий.

Основная проблема заключается в отсутствии конкретных методик исследований техногенных грунтов, которые могли бы точно и эффективно определять свойства гипсосодержащих грунтов. Также отсутствует единая классификация, которая позволяла бы систематизировать эти материалы на основе их инженерно-геологических характеристик. Это затрудняет понимание их поведения в различных условиях, особенно в процессе складирования.

Особое внимание следует уделить вопросам оценки устойчивости гипсосодержащих техногенных грунтов в условиях их длительного хранения. Данные, имеющиеся на сегодняшний день, недостаточны для точного прогнозирования изменения их свойств во времени. Это создает определенные риски при проектировании объектов, связанных с использованием или складированием таких материалов. Учитывая, что гипсосодержащие техногенные массивы могут подвергаться процессам выщелачивания, деформации и изменения структуры, становится очевидной необходимость разработки новых подходов к их исследованию [3].

Таким образом, изучение гипсосодержащих техногенных грунтов представляет собой сложную, но крайне важную задачу. Она требует междисциплинарного подхода, включающего инженерно-геологические, экологические и технологические аспекты. Разработка новых методов исследований, создание классификаций и прогнозных моделей поведения таких грунтов позволит не только повысить эффективность их использования, но и минимизировать возможные риски, связанные с их складированием и воздействием на окружающую среду [7].

Полученный для исследований материал является техногенным грунтом, продуктом нейтрализации серной кислоты известняком. При нейтрализации серной кислоты известняком образуется двуводный гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в виде кристаллогидрата. В осадке также обнаруживаются кальцит (CaCO_3) и небольшие количества доломита ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) [6]. Образующийся гипсосодержащий

отход представляют собой водонасыщенный, текучий, тиксотропный материал серого цвета. По минералогическому составу полученный продукт на 98% состоит из гипса.

Инженерно-геологическое обеспечение формирования гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты известняком включает комплекс работ по трем направлениям:

1. Изучение инженерно-геологических условий образования массива гипсосодержащих отходов;
2. Обоснование оптимальных параметров гипсонакопителей;
3. Мониторинг состояния объектов складирования изучаемых отходов [2].

В первом направлении целью является изучение инженерно-геологических условий образования гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты известняком, а именно, строение, состав, состояние и свойства. В работе использовались лабораторные методы для определения комплекса физико-механических свойств, а также стендовая установка для проведения эксперимента с целью замера порового давления.

Обоснование оптимальных параметров производят с учетом полученных результатов, необходимых для расчета устойчивости сооружения при различных условиях нагружения массива.

По итогам третьего направления выполняют работы по технологическому, маркшейдерскому и гидрогеомеханическому контролю состояния объекта, то есть проводят мониторинг состояния гипсосодержащих массивов [2].

Инженерно-геологические, геомеханические и геолого-геохимические исследования намывных техногенных массивов выполняются с целью повышения эффективности их формирования и обеспечения их дальнейшего безопасного использования. Эти исследования играют ключевую роль в минимизации экологических рисков и обеспечении промышленной безопасности на объектах, где происходит накопление отходов горнодобывающей и перерабатывающей промышленности [5]. Перспективным направлением является поиск способов утилизации или переработки гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты известняком с целью снижения нагрузки на окружающую среду [4].

В процессе таких исследований изучаются физико-механические свойства грунтов, их изменения в результате внешних воздействий, а также химический состав материалов, из которых формируются намывные массивы [1]. На основе полученных данных разрабатываются технологические решения, направленные на оптимизацию процесса формирования намывных массивов.

Таким образом, инженерно-геологические и геохимические исследования помогают не только повысить безопасность эксплуатации намывных массивов, но и способствуют внедрению принципов устойчивого развития в промышленной сфере. [2].

Литература

1. Гальперин А. М., Кутепов Ю. И., Круподеров В. С., Семенов О. Д. Мониторинг и освоение техногенных массивов на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 12. – С. 131-142. – EDN LUSBAJ.
2. Гальперин А.М. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях: Монография. (Охрана окружающей среды)/ А.М. Гальперин, Ю.И. Кутепов, Ю.В. Кириченко, А.В. Киянец, В.С. Круподеров, В.В. Мосейкин, В.П. Жариков, Х. Клапперих, Н. Тамашкович, Х. Чешлок. - Москва: Горная книга (МГГУ), 2012.
3. Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А., Поспехов Г. Б., Васильева А. Д. Инженерно-геологические особенности формирования техногенных массивов из различных видов фосфогипса // Горный журнал. 2023. № 5. С. 69-74. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.11 EDN: HTCRXX.
4. Литвинова Т. Е., Сучков Д.В. Комплексный подход к утилизации техногенных отходов минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).2022. №6 - 1.С.331348.DOI:10.25018/0236_1493_2022_61_0_331.
5. Пашкевич, М.А. Техногенные массивы и их воздействие на окружающую среду: монография / М. А. Пашкевич. – СПб.: Изд-во СПГГИ, 2000. – 230 с.
6. Прокудина Е.В., Тропников Д.Л., Каратаев А.В., Шукишина О.В. Нейтрализация технической серной кислоты природным известняком на ОАО «Святогор» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. №8. С. 340-345. EDN WJGFVL.
7. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П., Бурцев Л.И. Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества. – М.: Научтехлитиздат, 2003. – 262 с.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОСАДОЧНОСТИ ЛЁССОВЫХ ГРУНТОВ ВЕРХНЕЧЕТВЕРТИЧНОГО ДУШАНБИНСКОГО КОМПЛЕКСА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ВАХДАТ

Л. Хазраткулзода

Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Душанбе
E-mail: hazratkulzodalukmon@gmail.com

Введение

В современном мире год за годом сильно развивается строительство. Одна из наиболее важных и сложных проблем строительства – это проектирование и возведение зданий и сооружений на лёссовых просадочных грунтах с обеспечением их устойчивости, прочности и нормальной эксплуатации.

Лессовые породы широко распространены на территории Таджикистана - около 70% равнинных территорий Таджикистана повсеместно покрыты лёссовыми и лёссовидными породами. В настоящее время в столице Таджикистана в городе Душанбе с каждым годом заметно прогрессирует строительство многоэтажных зданий, что увеличивает риск деформаций сооружения при просадке грунтов основания.

Целью данной работы является изучение характеристика просадочности лёссовых грунтов верхнечетвертичного душанбинского комплекса территории города Вахдат. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: изучение литературы по теме работы; определение гранулометрического состава грунтов; определение показателей физических, физико-химических и др. свойств; определение относительной просадочности методом «одной» кривой.

Изучение лёссовых просадочных грунтов представляет собой важную задачу в связи с их распространённостью не только на территорию Таджикистана, но и на территории соседних стран и стран СНГ. Площадь, покрытая лёссовыми породами, составляет около 34 % континентальной части СНГ [4]

Характеристика объекта исследования

Исследуемые участки располагаются на правом берегу реки Кофарнихона недалеко от автомобильной дороги Душанбе – Вахдат. Рельеф не очень ровный всхолмлённый, находится на высоте 800 – 900 м. Территория относится к области с континентальным типом субтропического климата с обилием солнечного тепла, значительными суточными и годовыми колебаниями температур воздуха и почвы. Образцы для экспериментальных исследований отобраны летом 2022 г с естественных обнажений кирпичного завода №1 и кирпичного завода №2 северо-восточной часть г. Вахдата, студентами направления геологии филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе, под руководством Салихова Ф.С. по разным глубинам.

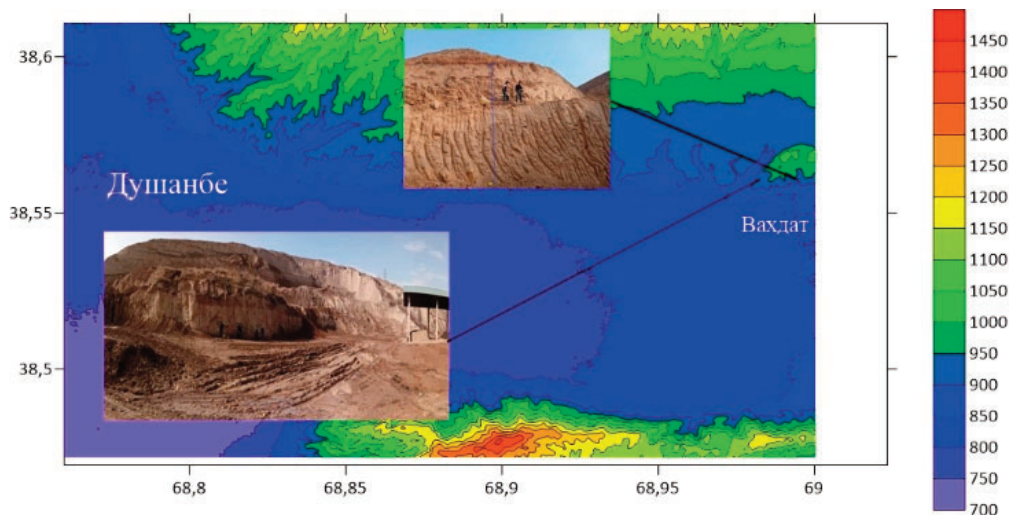


Рис. 1. Карта рельефа и стенки котлована участка №2, №1, из которой отобраны образцы (фото сделано студентами направления «Геология» филиала МГУ в городе Душанбе, лето 2022)



Рис. 2. Общий вид отобранных образцов(фото сделано автором, летом 2022)

Методика экспериментальных исследований

Определение плотности твердых частиц засоленных и гидрофильных грунтов проводят с нейтральной жидкостью (метод включен в ГОСТ 5180-2015 [3]) – чаще всего с обезвоженным и профильтрованным керосином. Определение гранулометрического состава производилось ареометрическим методом. [5]. Для определения влажности нижнего предела пластичности W_p и Влажность верхнего предела пластичности W_L предложено много различных методов, среди которых наибольшее распространение получил метод раскатывания в шнур по ГОСТ 5180-2015 [3].

Просадочность грунтов определялась методом одной кривой по [1]. При изучении просадочных свойств средних и тяжелых лёссовидных суглинков лучшие результаты дает метод одной кривой. Метод одной кривой позволяет определять относительную просадочность грунта при одной заданной величине давления.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Состав и строение исследованных лёссовых грунтов

Для определения гранулометрического анализа грунтов использовались два образца с разных участков. Один образец из верхней части разреза Кирпичный завод №1, глубина отбора 3 м. Другой образец из нижней части разреза Кирпичный завод №2, глубина отбора 55 м. Результаты гранулометрического анализа представлены на рис 3.

По классификации В.В. Охотина грунт с глубины 3 м – супесь тяжёлая пылеватая, так как содержание частиц $<0,002$ мм 8% попадает в диапазоне 6-10 %, а содержание пылеватых частиц больше, чем песчаных частиц. По классификации В.В. Охотина грунт с глубины 55 м – суглинок лёгкий пылеватый, так как содержание частиц $<0,002$ мм 11% попадает в диапазоне 10-15 %, а содержание пылеватых частиц больше, чем песчаных.

По коэффициенту неоднородности исследуемые образцы относятся к неоднородным, так как коэффициент неоднородности для первого образца 11, а для второго образца 7,3, т.е. больше, чем 5.

Свойства грунтов. В соответствии с задачами исследования получены данные о физических, физико-механических свойствах грунтов ненарушенного сложения и природной влажности.

Естественная влажность исследуемых образцов верхнечетвертичного Душанбинского комплекса варьирует в пределах 3,8-10,8%. Естественная влажность для обоих участков увеличивается в нижних частях разреза, потому что у поверхности земли выше испарение, а утечки хозяйственных вод и инфильтрация атмосферных осадков увеличивает влажность с глубиной.

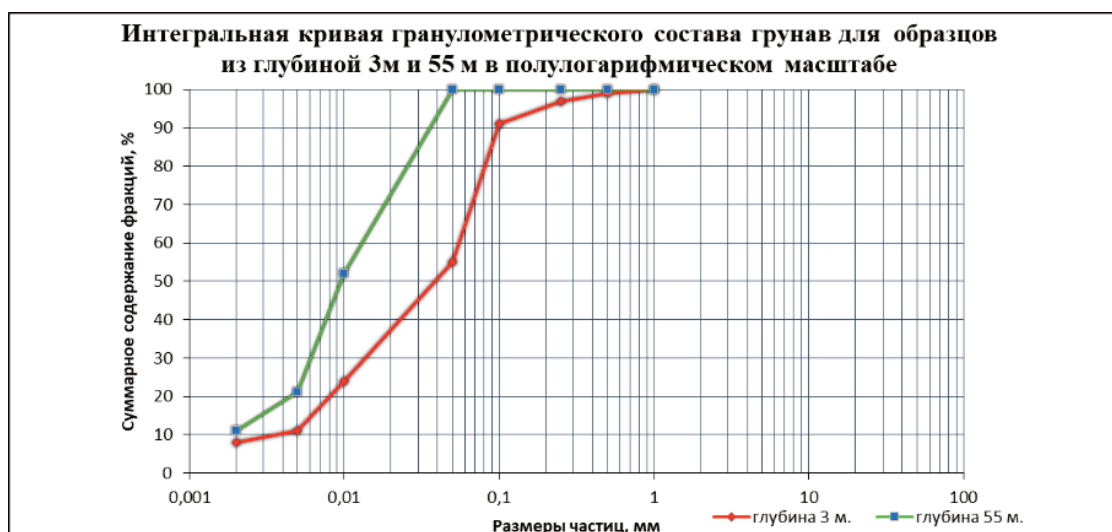


Рис. 3. Интегральные кривые гранулометрического состава образцов 1 и 5

Плотность твердых частиц зависит от минерального состава и присутствия органических веществ. По результатам, приведенным в видно, что плотность твердых частиц колеблется от 2,67 до 2,69 г/см³.

Плотность грунтов зависит от их минерального состава, пористости и влажности. С глубиной увеличивается плотность грунтов за счет повышения давления от веса вышележащих толщ и повышения влажности. Плотность данных образцов колеблется от 1,63 до 1,83 г/см³ при естественной влажности. После определения просадочности грунты уплотнялись. Значения их плотности достигало от 2,12 до 2,46 г/см³.

По сравнению с плотностью, плотность скелета грунта зависит только от пористости и минерального состава. Чем ниже пористость и выше содержание тяжелых минералов в грунте, тем выше плотность его скелета. Результаты расчета плотности скелета по изученным образцам приведены в. Значения плотности скелета до опыта закономерно увеличивается по глубине от 1,47 до 1,70 г/см³.

Для просадочных грунтов характерна высокая пористость и наличие макропор. Макропоры имеют форму извилистых вертикальных канальцев. Пористость изученных грунтов до опыта уменьшается с глубиной за счет давления веса вышележащих пород от 45% до 36%. После проведения опыта по просадочности пористость увеличивается до 25-34%.

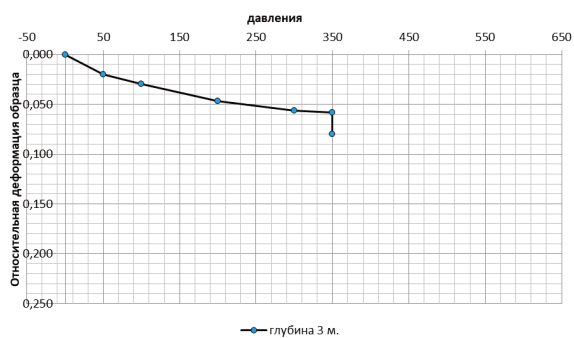
Соответственно коэффициент пористости находится в интервале 0,57 – 0,82 д.ед. А также в целом отмечается тенденция уменьшения коэффициента пористости с глубиной. После определения просадочности коэффициент пористости, как и пористость, уменьшился.

Определение относительной просадочности лессовых грунтов методом «одной» кривой. Относительная просадочность отобранных образцов определялась методом одной кривой. Для образцов участка №1 проводили испытание с давлением 0,3 МПа (300 кПа). Таким образом, мы определяли просадочность при дополнительной нагрузке от сооружения, т.к. природное давление маленькое. Для образцов участка №2 проводили испытание с давлением 0,6 МПа (600кПа). Образцы отобраны с больших глубин, просадку следовало бы определять при природной нагрузке, т.к. глубина активной зоны скорее будет меньше, чем эти глубины, но максимальная нагрузка, которую могут передавать используемые приборы 0,6 МПа. Для образца 3 это есть природная нагрузка.

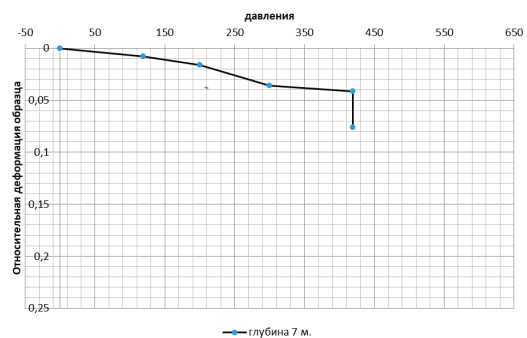
Образец 1. По ГОСТ 25100-2020 [2] грунт является слабопросадочным, так как коэффициент относительной просадочности при нагрузке $P = 0,3$ МПа составил $\epsilon_{sf}=0,021$.

При увеличении нагрузки и замачивании водой высота испытываемого грунта сильно уменьшается от 32,96 мм до 32,21 мм, то есть образцы грунта проседают.

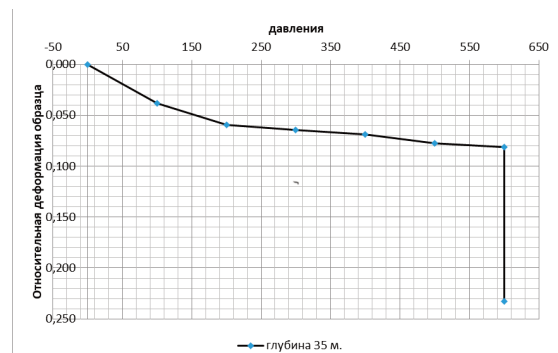
Образец 1. По ГОСТ 25100-2020 [2] грунт является слабопросадочным, так как коэффициент относительной просадочности при нагрузке $P = 0,3$ МПа составил $\epsilon_{sf}=0,021$. При увеличении нагрузки и замачивании водой высота испытываемого грунта сильно уменьшается от 32,96 мм до 32,21 мм, то есть образцы грунта проседают. Образец 2 является среднепросадочным, так как коэффициент относительной просадочности при нагрузке $P=0,3$ МПа составил $\epsilon_{sf}=0,035$. При увеличении



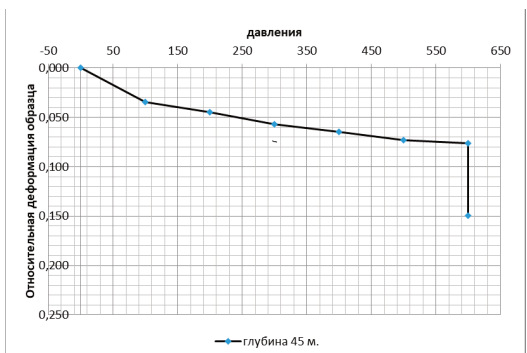
1) глубина отбора 3 м



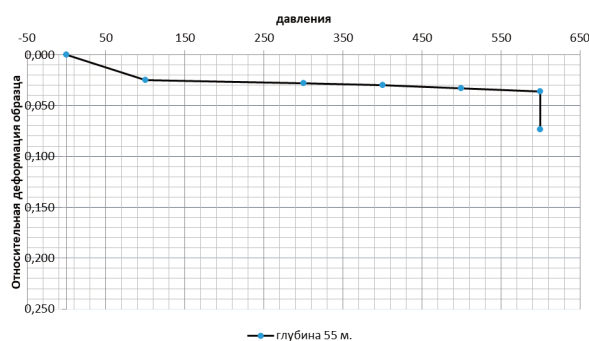
2) глубина отбора 8 м



3) глубина отбора 35 м



3) глубина отбора 45 м



5) глубина отбора 55 м

Рис. 4. Графики зависимости относительной деформации от давления для образцов

нагрузки и замачивании водой высота испытываемого грунта сильно уменьшается от 34,44 мм до 33,61 мм, то есть грунт проседает.

Коэффициент относительной просадочности Образец №3 при нагрузке $P=0,6$ МПа составил $\epsilon_{sI}=0,151$. Природная нагрузка 607 кПа, т.е. грунт просадочный при природной нагрузке. При увеличении нагрузки и замачивании водой высота испытываемого грунта сильно уменьшается от 32,36 мм до 28,39 мм, то есть проседают. У четвертого образца коэффициент относительной просадочности при нагрузке $P=0,6$ МПа составил $\epsilon_{sI}=0,073$. То есть грунт характеризуется высокими значениями просадочности. При увеличении нагрузки и замачивании водой высота испытываемого грунта сильно уменьшается от 32,52 мм до 30,45 мм, то есть проседают. У пятого образца коэффициент относительной просадочности при нагрузке $P=0,6$ МПа составил $\epsilon_{sI}=0,038$. То есть грунт характеризуется высокими значениями просадочности. При увеличении нагрузки и замачивании водой высота испытываемого грунта сильно уменьшается от 33,78 мм до 32,6 мм, то есть проседают (рис. 4.).

Пористость в естественном состоянии находится в интервале 36-45 %, коэффициент пористости находится в интервале 0,57-0,82 д.ед. Плотность в естественном состоянии изменяется от 1,63-1,83 г/см³. Плотность твёрдых частиц в исследуемом лёссовом массиве составляет 2,67-2,69 г/см³. Влажность верхнего предела пластичности находится в интервале от 28 до 34,6 %. Влажность нижнего предела пластичности находится в интервале от 20,2 до 22,6 %. Влажность в естественном состоянии находится в диапазоне от 3,8 до 10,8%. Число пластичности грунтов находится в интервале от 7,5

до 12,4, и по ГОСТ 25100-2020 [2] грунты относятся к суглинкам, т.к. оно находится в интервале 7-17. Консистенция грунтов твердая, т.к. $I_L < 0$.

По относительная просадочность был сделан выводы: Образец 1 при нагрузке 0,3 МПа – слабopосадочный – относительная просадочность 0,021. Образец 2 при нагрузке 0,3 МПа - средне-просадочный – относительная просадочность 0,035. Образец 3 при природной нагрузке 0,6 МПа характеризуется относительной просадочностью 0,151. Образец 4 при нагрузке 0,6 МПа характеризуется относительной просадочностью 0,073. Образец 5 при нагрузке 0,6 МПа характеризуется относительной просадочностью 0,038.

Анализируя данные по проведённой работе, можно прийти к выводу, что основными факторами, влияющими на величину просадочности, являются пористость, влажность, и плотность.

Литература

1. ГОСТ 23161-2012. Грунты. Метод лабораторного определения характеристик просадочности. М.: Стандартинформ, 2013.
2. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 42 с.
3. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2005. 19 с.
4. Трофимова В.Т. / Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
5. Широков В.Н, Королёв В.А, Шанина В.В./Лабораторный практикум по грунтоведению/Душанбе.: Филиал МГУ им. М.В. Ломоносов, 2019. 240 с.

СЕКЦИЯ 4. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ МАССИВОВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ МЕТОДАМИ БИОДИАГНОСТИКИ

И.Ю. Григорьева, А.В. Морозов, С.С. Садов

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1
E-mail: ikagrig@inbox.ru

Общеизвестно, что на территории как действующих, так и выработанных нефтяных и нефтегазовых месторождений к настоящему времени образовались значительные по объему массивы загрязнённых грунтов. При этом состав загрязнения может быть самым различным. Помимо собственно загрязнения нефтью и продуктами её переработки в массивы грунтов могут поступать сточные промышленные воды, промывочные жидкости и другие вещества, применяемые как для извлечения нефти, так и обеспечения всего комплекса технологического процесса добычи углеводородного сырья. На сегодняшний день при оценке степени загрязнения массивов грунтов в нефтедобывающих регионах в качестве основных контролируемых показателей выступает уровень содержания в пробах грунтов нефтяных углеводородов и хлорида натрия. И если контроль уровня содержания углеводородов нефти не вызывает вопросов, то оценка засоления обычно не всегда так очевидна для исследователей, не имеющих дела с подобными объектами. Отметим, что вопросы, так называемого опережающего хлоридно-натриевого загрязнения, были достаточно подробно в своё время рассмотрены в классических работах Ю.И.Пиковского и Н.П.Солнцева [5, 6].

На территории месторождений Западной Сибири, где в большей степени довелось работать авторам настоящей статьи, загрязнению подвергаются наряду с массивами торфяников, массивы, сложенные песчаными грунтами (рис. 1). В качестве примера дадим характеристику подходов к экологической оценке состояния загрязнённых массивов, которая была осуществлена нами на примере территорий наиболее крупных месторождений, находящихся в пойме р. Обь – Усть-Балыкском и Южно-Сургутском. В виду своей геоморфологической приуроченности рассматриваемых территорий основным грунтом, слагающим массивы и подвергающимся загрязнению, является преимущественно кварцевый по минеральному составу песок. При этом физические свойства добываемой нефти предполагают использование специальных растворов для уменьшения ее вязкости и повышения коэффициента нефтеотдачи [4].

Следует особо оговорить, что экологическая оценка состояния массивов загрязнённых грунтов в первую очередь связана с последующей обязательной их рекультивацией, которая проводится в два этапа: технический и биологический [1]. При разработке схем рекультивации подобных территорий необходимо учитывать не столько покомпонентный состав загрязнения, сколько интегральный характер его воздействия, экологическая оценка и биологическая значимость которого не может быть адекватно оценена только на основе химико-аналитических исследований.

С целью определения биологической значимости состава загрязнения нами проведены серии модельных экспериментов. Для чего были созданы модели на основе чистого кварцевого мелкого песчаного грунта, с последующим внесением в них дизельного топлива или раствора хлорида натрия, а также варианты с одновременным (комбинированным) загрязнением песчаного грунта дизельным топливом и раствором хлорида натрия. В последующем был проведен эксперимент по фитотестированию (как вариант биодиагностики) с применением культуры горчицы белой (*Sinapis Alba L.*).

Исследования проводились методом планшетного фитотестирования, требования к которому отражены в ГОСТ Р ИСО 18763-2019 [2]. Данная методика предусматривает сравнение всхожести и раннего роста высших растений в исследуемом и контрольном грунте в специальных прозрачных планшетах в течение 96 часов при температуре 25°C в темном помещении (без доступа света). В дополнение к нормируемой методике нами проводился контроль влажностных характеристик проб



Рис. 1. Массивы загрязненных песчаных грунтов на одном из месторождений Западной Сибири (фото Григорьевой И.Ю.)

до и после проведения фитотестирования. По истечению инкубационного периода измерялись морфометрические показатели (длина корня и ростка), а также процент всхожести используемой тест-культуры. В качестве контроля выступал исходный незагрязненный песчаный грунт.

Результаты эксперимента по биодиагностике показали, что одиночное загрязнение песчаного грунта дизельным топливом в концентрациях 3 и 5% по массе оказывает стимулирующее воздействие на рост и развитие тест-культуры – горчицы белой, по сравнению с контролем (рис. 2). Данный эффект может быть связан с органической природой углеводородов и, следовательно, содержанием питательных веществ в диапазоне толерантности для данного растения. При концентрациях дизельного топлива 1 и 7% по массе наблюдается снижение исследуемых тест-параметров, причем, низкое содержание углеводородов оказывает более значимый токсический эффект, чем высокое. Данные закономерности могут быть связаны с недостатком полезных компонентов в случае низкой концентрации и избытком в случае высокой.

Комбинированное загрязнение песчаного грунта дизельным топливом и раствором хлорида натрия ($NaCl$) в концентрации 0,1% по массе резко снижает исследуемые морфологические показатели тест-культуры, и эффекта стимулирования уже не наблюдается. В целом независимо от концентрации дизельного топлива внесение в грунтовую систему раствора хлорида натрия даже в небольшой концентрации подавляет рост и развитие горчицы белой. Главным образом снижается биомасса проросших растений. Наибольший токсический эффект наблюдается в концентрации дизельного топлива 5% и $NaCl$ 0,1% по массе.

При комбинированном загрязнении песчаного грунта дизельным топливом и раствором хлорида натрия в концентрации 0,5% по массе можно также отметить наличие острого токсического эффекта (см. рис. 2). В этом случае наибольшую биологическую значимость имеют загрязнения дизельным топливом в концентрации 1 и 7% по массе в сочетании с хлоридно-натриевым загрязнением. Однако главным образом, в отличие от более низкой концентрации $NaCl$, снижается всхожесть семян, а не биомасса проростков.

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что в случае одиночного загрязнения песчаного грунта, в зависимости от концентрации возможен как небольшой токсический эффект, так и стимулирующее воздействие углеводородных компонентов загрязнителя на используемую тест-культуру. При засолении песчаного грунта наблюдается эффект синергизма двух загрязняющих веществ. Даже в случае небольших концентраций хлорида натрия (0,1 и 0,5% по массе) отмечается резкое снижение исследуемых морфологических показателей тест-культуры. Увеличение концентрации хлоридно-натриевого загрязнения меняет направленность токсического воздействия: с уменьшения длины ростков и корней проросших семян до полного сни-

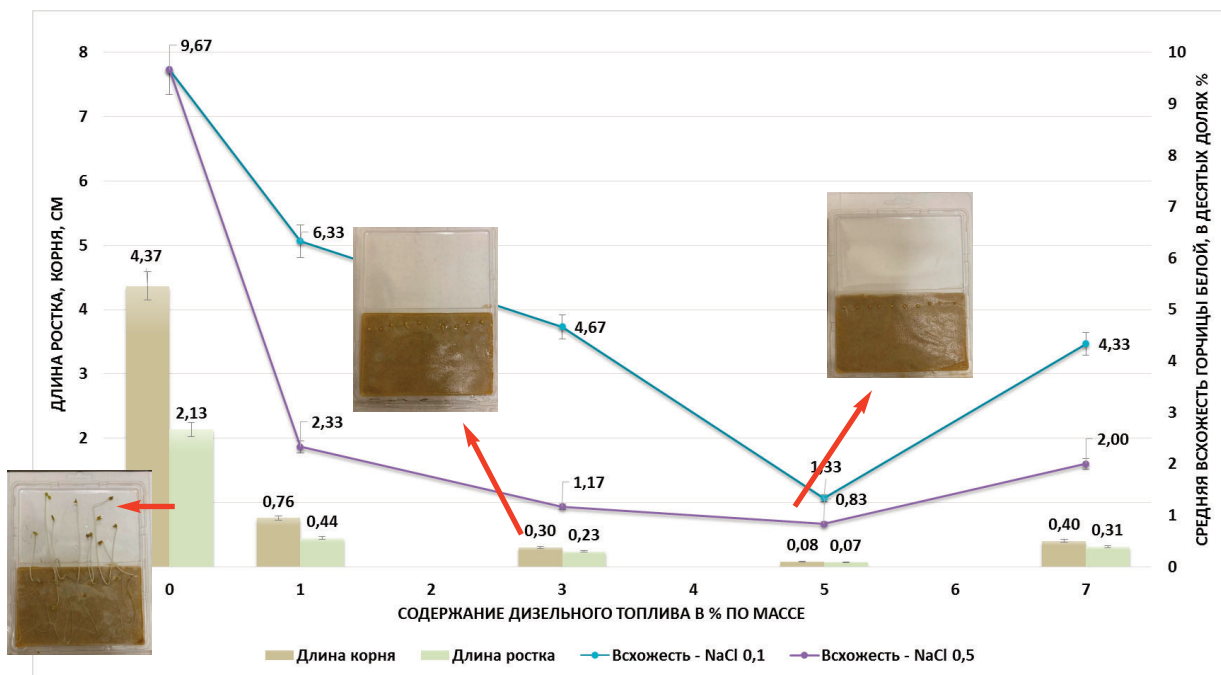


Рис. 2. Зависимость значений исследуемых тест-параметров горчицы белой (*Sinapis alba L.*) от содержания дизельного топлива и раствора хлорида натрия (NaCl) в % по массе в песчаном грунте

жения способности к прорастанию семян у исследуемой тест-культуры горчицы белой (*Sinapis A.*). Проведенный модельный эксперимент наглядно продемонстрировал, что даже незначительное засоление песчаных грунтов, которые уже подверглись углеводородному загрязнению, может вызывать абсолютно новые биологические реакции у живых организмов.

Для месторождений Западной Сибири, особенно расположенных на пойменных участках, в условиях загрязнения массивов песчаных грунтов нефтью и нефтепродуктами, при оценке возникновения возможных токсических эффектов, необходимо принимать во внимание, что основную биологическую значимость имеет именно хлоридно-натриевое загрязнение. При этом биологическая значимость засоления песков оказывается весьма существенной даже при незначительных концентрациях соли. Следует особо подчеркнуть, что в этом случае диагностика наличия солевого загрязнения в нефтезагрязненных песках химико-аналитическими методами представляет особую сложность из-за происходящих физико-химических взаимодействий в грунтовой системе [3]. Морфологические особенности поверхности кварцевых зерен песка, подвергшегося комбинированному варианту загрязнения, представлены на рис. 3. При электронно-микроскопических исследованиях на поверхности зерен в высушенном песчаном грунте наблюдались «хлопьевидные наросты», распределенные участками. Образование подобных хлопьев связано с тем, что при взаимодействии двух загрязняющих веществ образуется эмульсия, которая при высыхании (необходимом в процессе пробоподготовки образцов для электронно-микроскопических исследований) и приводит к формированию подобных структур 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 (усилением токсических свойств используемых веществ). Химическая и физико-химическая природа реакции выших растений при проявлении данного эффекта на сегодняшний день требует дополнительных экспериментальных исследований и теоретических обоснований.

В условиях рассматриваемых месторождений состав загрязняющих веществ массивов песчаных грунтов достаточно сложно однозначно оценить химико-аналитическими методами. Проведенные электронно-микроскопические исследования показали, что поверхность кварцевых зерен по аналогии с модельными образцами покрыта различного рода хлопьевидными и пленочными образованиями. Состав подобных образований будет существенно варьировать от времени и места взятия пробы грунта, поскольку в процессе разработки месторождения изменяются как технологические особенности самого процесса нефтедобычи, так и состав добываемой нефти. Кроме того, зачастую на территориях месторождений применяют схемы рекультивации, предполагающие внесение дополнитель-

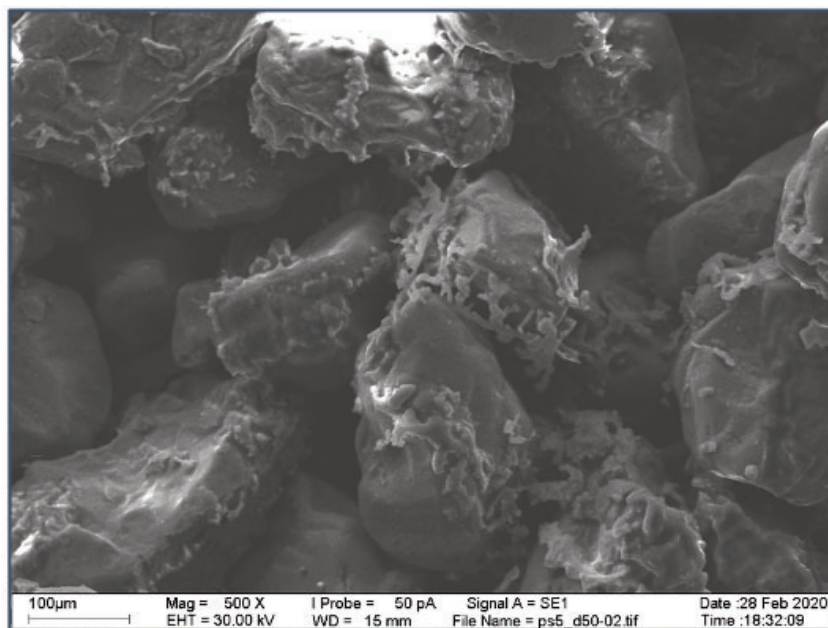


Рис. 3. Морфологические особенности поверхности кварцевых зерен в пробе модельного грунта, загрязненного дизельным топливом в концентрации 3 % по массе и раствором $NaCl$ в концентрации 0,5 % по массе. РЭМ – изображения при 500-х кратном увеличении¹

¹ Электронно-микроскопические исследования выполнены М.С.Черновым в лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов, кафедры инженерной и экологической геологии, геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова на оборудовании, приобретенном за счёт средств развития Московского университета.



Рис. 4. Перемешивание загрязненных песчаных грунтов с цементным раствором в процессе рекультивации на одном из месторождений Западной Сибири (фото Григорьевой И.Ю.)

ных реактивов и веществ (цемента, извести, торфа, органических связующих и т.д. (рис. 4). В такой ситуации без проведения детальных лабораторных экспериментов по биотестированию с оценкой биологической значимости композиционного влияния состава загрязняющих веществ осуществление эффективных этапов биологической рекультивации достичь бывает достаточно сложно.

Экологическая оценка состояния нефтезагрязненных песчаных грунтов должна вестись с обязательным применением методов биодиагностики. И как показывает анализ накопленных на сегодняшний день литературных данных и экспериментальные исследования авторов, в качестве тест-культур наиболее целесообразно использовать высшие растения.

Литература

1. ГОСТ Р 57447-2017. Рекультивация земель и земельных участков, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Основные положения // М.: Стандартиформ, 2019. — 25 с.
2. ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях развития высших растений // М.: Стандартиформ, 2019. — 27 с.
3. Григорьева И.Ю., Морозов А.В., Gladchenko M.A. Физико-химические процессы, происходящие на поверхности кварцевого песка при внесении загрязнения и их влияние на результаты фитотестирования // Грунтоведение. — 2022. — Т. 19, № №2. — С. 27–39.
4. Новиков А. А., Федяева И. М. Сравнительная анализ свойств нефтей месторождений Западной Сибири, Вестник Югорского Государственного университета, 2010. – В. 4 (19). — С. 81-83.
5. Пиковский Ю.И., Исмаилов Н. М., Дорохова М.Ф. Основы нефтегазовой геоэкологии / Под ред. А. Н. Геннадиева. – М.: ИНФРА-М, 2019. — 399 с.
6. Солнцева Н. П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с.

ПОЛИГОНЫ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ КАК ОДИН ИЗ ИСТОЧНИКОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ

В.Л. Злобина, Ю.А. Медовар, И.О. Юшманов

Институт водных проблем РАН, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3
E-mail: medovar51@list.ru

Во многих регионах мира многолетнее накопление продуктов жизнедеятельности является одной из актуальнейших проблем.

В Российской Федерации отмечается ежегодное увеличение объема свалочных масс и наблюдается загрязнение территорий (водоохранные зоны, лесные и сельскохозяйственные угодья, и др. за счет постоянного поступления отходов в природные среды (3,7 -5,5 млрд тонн).

В зарубежных изданиях [1,6] приводятся результаты изучения влияния свалочных масс на загрязнения поверхностных и подземных вод различными токсикантами. Особое внимание уделяется системе сбора и утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) [2,5]. Для сбора и очистки фильтрата устанавливаются специальные установки, а также отстойники-испарители. Для предотвращения регионального распространения токсикантов применяются противofiltrационные экраны, промывка свалочной массы, откачка фильтрата и др.). Негативное воздействие свалок на природную среду может компенсироваться различными защитными мероприятиями, так, например отводными дренажными устройствами с дальнейшей утилизацией фильтратов. Иногда откачивающие скважины оборудуются непосредственно в теле свалки. Часто применяется рециркуляция фильтрата. Для минимизации воздействия свалки на окружающую среду используются биогазовые установки по отводу метана.

На ряде свалок северо-западной Европы оборудование наблюдательных скважин и ярусных пьезометров дает возможность изучать режим изменения уровней техногенных водоносных горизонтов, образующихся в свалке за счет инфильтрации атмосферных осадков, а также «техногенных грунтов», образующихся при уплотнении свалочной массы. Применение бурения скважин и геофизические методы (каротаж, электрическое зондирование и др.) позволяют оценить фильтрационную неоднородность отложений свалки.

За счет ТКО существенное загрязнение почвенного покрова распространяется на десятки километров. Суммарный коэффициент загрязнения (Zс) по 19 токсикантам достигает 165. Значения этого показателя остаются достаточно высокими на расстоянии 5-8км от свалки (до 45-61).

Перечисленные аспекты рассматривались для наиболее урбанизированной территории Московского региона, в котором за длительный период времени образовалось много свалок во всех его физико-географических ландшафтах (Верхневолжская низина, Мещерская низина, Клинско-Дмитровская гряда, Заокское плато). Обобщенные данные по свалкам Московского региона приведены в таблице 1.

| <i>Таблица 1</i> | | | |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------|---|
| Свалки Московского региона | | | |
| Тип свалки | Количество | Площадь, га | Продукты техногенеза |
| Рекультивационные | 11 | 5.1 –63.6 | Неорганические вещества |
| Действующие | 3 | Более 20 | Токсичные элементы |
| Перспективные | 3 | До 10-20 | Органические вещества Газы CO ₂ , H ₂ S, CH ₄ |

Наряду с перечисленными типами полигонов существуют многочисленные стихийные участки складирования различных отходов, которые нередко сосредоточены около поселений и городов, на сельскохозяйственных и залесенных территориях, а также в водоохраных зонах. Многие полигоны

приурочены к заброшенным карьерам, балкам и понижениям в рельефе. Складирование отходов возможно в виде насыпных полигонов. Емкость полигонов достигает 40-60млн. тонн. Объекты имеют разные геометрические и технологические характеристики (площадь, мощность), продолжительность накопления отходов, занимают различные площади в окружающей среде и подразделяются: на крупные (от 10 до 65га), средние (до 10га) и небольшие (менее 4га). Продолжительность накопления отходов на свалке как правило не должна превышать 15–20 лет. Территории ТКО (в большинстве случаев) не всегда безопасны для складирования отходов. Высокая категория риска свалок на подземные и поверхностные воды обусловлена необратимостью их воздействия на окружающую среду (табл. 2) Существующие ТКО характеризуются различным уровнем экологической опасности.

| <i>Таблица 2</i> | |
|--|---|
| Негативные показатели и характеристики свалок | |
| Показатель | Характеристика |
| Категория риска | Высокая |
| Обратимость воздействия | Необратимое |
| Положение | Наземное, подземное |
| Масштабы распространения | км ² |
| Класс воздействия | Химический, физико- химический, биологический, механический, физический, санитарно-токсикологический, радиоактивный |
| Время воздействия | Длительное |

Свалки аккумулируют разнообразные по составу отходы и могут содержать до 800 различных загрязнителей всех существующих классов опасности (от I до V). Тело свалки, состоящее из конгломерата различных отходов, является сложной многофазной техногенной системой, включающей в том числе фильтрат и газовую составляющую [3]. При смачивании тела свалки атмосферными осадками образуются значительные объемы фильтрата (до 10⁴м³).

В техногенном массиве происходит комплекс физических, физико-химических процессов (гидролиз, сорбция, ионный обмен, комплексообразование и др.), включая химико-биологические взаимодействия. Образование летучих жирных кислот (уксусная, пропионовая и др.) обусловлено процессами гидролиза белков, углеводов и жиров (кислотогенез).

Степень и скорость трансформации состава фильтрата в свалке зависят от ее возраста и площади и происходит в несколько стадий.

Для верхней части свалки на **первой** стадии характерны **аэробные** условия с преобладанием O₂. С глубиной происходит вытеснение O₂ углекислым газом. Для этой части свалки характерны высокие значения влажности (до 85%).

За счет разложения органических веществ наблюдаются высокие концентрации углекислоты. Брожение органических веществ способствует образованию не только CO₂, но и CH₄, соответственно уменьшается рН (до 5,8-4,1) и увеличивается температура фильтрата (до 60°C), что вызывает дополнительное образование CO₂ и CH₄.

С уплотнением отложений в свалке образуются **анаэробные** условия, что способствуют жизнедеятельности различных микроорганизмов в обводненной толще. На **второй** стадии происходит незначительное уменьшение концентраций макроэлементов и динамичное уменьшение концентраций тяжелых металлов.

На стадии метаногенеза (**третья стадия**) образуются высокомолекулярные соединения. Состав фильтрата по геохимическому типу стремится к Cl-Na типу. Для свалок, площадь которых составляла более 100га, содержание органических веществ в фильтрате превышало 300 мг/дм³, а для свалки меньшей площади (55 га) – 71 мг/дм³ (при возрасте свалок около 25 лет).

На **последней** стадии трансформации фильтрата увеличение количества метабактерий способствуют резкому увеличению концентраций CH₄ и CO₂, и фильтрат имеет устойчивый Cl-Na геохимический тип.

Каждая из рассмотренных стадий характеризуется своей продолжительностью. Наименьшей (до года) отличается первая, аэробная стадия. Перечисленные стадии развития продолжают значительный период времени (до 100 лет), а влияние фильтрата на поверхностные и подземные воды после закрытия свалок может продолжаться еще десятилетия. Наибольшее воздействие свалок на подземные воды происходит в первые 4-7 лет после их образования.

В качестве примера рассмотрен полигон бытовых и промышленных отходов «Дубна-1», расположенный в междуречье рек Волги, Дубны и Сестры и приуроченный к Нижне-Волжской равнине. Свалка «Дубна-1» функционирует с 60-х годов XX века.

По оценке степени уязвимости физико-географических провинций Московской области к загрязнению подземных вод, эта территория является весьма чувствительной к загрязнению подземной гидросферы (по сочетанию природных и антропогенных факторов). Грунтовые воды залегают в песчано-глинистых отложениях четвертичного возраста на небольших глубинах (0,5-2 м).

Сформированная толща (техногенные грунты) представлена отходами различного генезиса. Полигон (площадь около 3 га) представляет собой насыпь, окруженную двумя дренажными канавами для отвода фильтрата. Из-за отсутствия наблюдательных сети скважин фильтрат отбирался из дренажных канав, а грунтовые воды - из двух колодцев садоводческих товариществ (на расстоянии 80 и 300 м от тела свалки) с 2014 г.

Минерализация фильтрата в теле свалки на 2022 г. составляла более 4 г/дм³, а в ближайшем колодце превышала 1,5 г/дм³.

В фильтрате наблюдались повышенные концентрации тяжелых металлов, а по характеру изменения величины рН отмечается изменение щелочно-кислотных условий, характерных для одной из последних стадий разложения свалочных масс.

Размещение полигонов ТКО в природных ландшафтах создает специфические и весьма неблагоприятные условия для поверхностных и подземных вод. Трансформируются элементы водного баланса (испарение, эвапотранспирация, инфильтрационное питание и др.).

Воздействие свалок на поверхностные и подземные воды продолжается длительное время после закрытия полигонов и требует комплексного и разнообразного мониторинга (гидрогеологический, санитарно-токсикологический и др.). Характер и динамика загрязнения подземной гидросферы и степень ее трансформации определяются комплексным взаимодействием природных и техногенных факторов, таких как характеристики самого полигона ТКО (мощность и генезис накоплений, возраст масс, состав фильтрата и др.), а также степенью защищенности водоносных систем (наличие глинистых экранов, трещиноватость и закарстованность пород).

Техногенные грунты полигонов сложно утилизировать, они продолжают представлять опасность и после их закрытия. По санитарным соображениям территории законсервированных полигонов неэкологично использовать под строительство жилых домов, но вполне можно задействовать под спортивные комплексы, в частности горнолыжные базы и склоны после засыпки территорий нетоксичными породами. Примером этого могут быть планы создания спортивных комплексов в Саларьево, Дубне, Сходне и др. Немного не в тему, но тоже про спортивное использование мусорных комплексов – в Амстердаме в центре города расположен мусоросжигательный/ мусороперерабатывающий завод оригинальной архитектурной формы, крыша которого используется как лыжный спуск.

К сожалению, кроме планов создания спортивных комплексов на месте отработанных полигонов, на северо-западе Российской Федерации планируется создание новых полигонов [4] в местах, наиболее уязвимых к техногенному воздействию на природную среду (Архангельская обл., Карельский перешеек). Эти территории даже после закрытия полигонов не смогут рекультивироваться даже в ближайшие столетия.

Работа проводилась в рамках научной программы Института водных проблем РАН, проект № FMWZ-2022-0001

Литература

1. П. Гранлёф, А. Карлссон, С.И. Юшманова, Ю.А. Медовар, И.О. Юшманов, Е.Г. Хмельченко. Роль муниципалитетов в обращении с отходами и опыт реконструкции действующих полигонов на примере *Dåva deponi och avfallscenter i Umeå* (Швеция)//Муниципальная академия. 2022 1, с. 139-147

2. Джамалов Р.Г., Карлссон А., Юшманова С.И., Медовар Ю.А., Юшманов И.О., Подсечин В.П., Хмельченко Е.Г. Обращение с бытовыми отходами в странах Северной Европы и России (*Waste management in the countries of Northern Europe and Russia*) //Муниципальная академия, 2021, № 1, с. 208–217. DOI: 10.52176/2304831X_2021_01_208
3. В.Л. Злобина, Ю.А. Медовар, И.О. Юшманов. Оценка опасности загрязнения окружающей среды свалками промышленных и коммунальных отходов. // *Водные ресурсы*, 2021, том 48, № 3, с. 315–321
4. Медовар Ю.А., Юшманов И.О., Хмельченко Е.Г., Гончаров М.В. Риски создания полигонов твердых коммунальных отходов для северных территорий России. //Муниципальная академия № 2 2024. стр. 127-133
5. Медовар Ю.А., Юшманов И.О., Хмельченко Е.Г., Черкасова М.А. Современные полигоны ТКО - отложенное на завтра решение проблемы переработки и утилизации отходов // *Муниципальная академия*, 2022, № 4, стр. 156 – 165
6. Karlsson A., Medovar Y.A., Podsechin V.P., Yushmanov I.O., Yushmanova S. Prolonged impact of closed municipal solid waste landfills on groundwater: (Пролонгированное воздействие закрытых полигонов ТКО на подземные воды). // *VATTEN – Journal of Water Management and Research* 77: 4. 2021 p 203-212. журнал Шведской ассоциации по водным проблемам (*Water association of Sweden*) при университете г. Лунд, Швеция

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ДИФФУЗИИ РАДОНА В МАССИВАХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Е.И. Кайгородов^{1,2}, П.С. Микляев^{1,2}, Т.Б. Петрова³, А.П. Кулаков¹

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2

² ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, 123103, г. Москва, ул. Щукинская, д. 40

³ МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

E-mail: direct@geoenvironment.ru

Введение

Наибольший вклад в дозу облучения населения вносят дочерние продукты распада радона-222. По данным международных организаций (ВОЗ, МКРЗ и др.) радон является вторым по значимости фактором риска рака легкого после курения. Радон способен поступать в здания из грунта, строительных материалов, систем централизованного водоснабжения и накапливаться в помещениях, существенно увеличивая риск возникновения онкологических заболеваний. Радон-222 образуется в результате распада радия-226, повсеместно присутствующего в окружающей среде. Основным источником поступления радона в здания, как правило, являются грунты, являющиеся основанием зданий. На некоторых территориях сочетание геологических условий и радиационно-физических свойств грунтов могут приводить к формированию в зданиях концентраций радона, превышающих нормативные уровни. Такие территории относят потенциально радоноопасным.

Потенциальная радоноопасность территории в первую очередь связана с высокими значениями концентрации радия в грунте, однако интенсивность выделения радона с поверхности грунта (эксхалация) может существенно различаться в зависимости от физических свойств грунтов. Перемещение радона в массиве грунта осуществляется за счет двух основных механизмов переноса: диффузионного и конвективного. В большинстве крупных городов России грунты основания зданий представлены дисперсными глинисто-песчаными отложениями, в которых отсутствуют необходимые условия для конвективного переноса радона. В этой связи, интенсивность выделения радона из грунтов может быть удовлетворительно описана диффузионной моделью переноса. Основные параметры диффузионного переноса – объемный (эффективный) коэффициент диффузии радона (D) и длина диффузии радона в грунтах (L). Объемный (эффективный) коэффициент диффузии представляет собой коэффициент пропорциональности между плотностью потока и градиентом концентрации радона в среде, длина диффузии — это расстояние, на котором активность радона, проходящего через слой грунта вследствие диффузии, уменьшается в результате распада в e раз (основание натурального логарифма $e = 2,72$). Физически величина L является средним расстоянием, на которое атомы радона перемещаются в массиве грунта за счет диффузии от момента образования до распада. Коэффициент и длина диффузии радона определяются проницаемостью грунта, которая в свою очередь зависит от эффективной пористости (пустотности) и степени заполнения пор водой. Концентрация радия в грунте и параметры переноса радона в грунтах определяют плотность потока радона (ППР) с поверхности грунта – величину, напрямую характеризующую радоноопасность территории. Поэтому определение коэффициента диффузии и длины диффузии радона в грунтовых массивах на разных территориях является важной и актуальной задачей.

Существуют разные способы определения параметров переноса радона в грунтах. Достаточно широко распространены лабораторные методы определения коэффициента диффузии в образцах грунтов, строительных и изоляционных материалов [1, 5], основными проблемами которых является отбор проб монолитов, что чрезвычайно сложно в песчаных и скальных грунтах, а также проблема перехода от свойств в образце к свойствам массива, обусловленная прежде всего, неоднородностью массивов и недостаточной представительностью отдельных образцов. Предложены также полевые методы оценки коэффициента диффузии и длины диффузии радона в грунтовых массивах, основанные на измерениях содержания радона в грунтовом газе на двух разных глубинах [4], совместном измерении плотности потока и объемной активности торона в грунтах [10], а также совместных измерениях плотности потока радона и концентрации радона и радия-226 на разных глубинах [3]. Однако, большинство перечисленных методов обладают высокой неопределенностью, требуют до-

статочно сложных измерений концентрации радона в грунтовом газе, а также определения активной пористости грунтового массива, что также представляет значительную проблему. В данной работе предлагается наиболее простой и в то же время эффективный метод оценки параметров переноса радона в грунтовых массивах, основанный на относительно несложных измерениях плотности потока радона с поверхности грунта и удельной активности радия-226 в грунтах, а также плотности грунтов и коэффициента эманирования.

Объекты наших исследований – массивы глинистых грунтов в пределах потенциально радоноопасных территорий, расположенные в разных регионах России и отличающиеся разным геологическим строением и климатическими условиями: г. Пятигорск Ставропольского края, в г. Белокуриха Алтайского края и Краснокаменск Забайкальского края. Исследовались массивы глинистых грунтов. В Пятигорске – просадочные лессовидные суглинки и глины майкопской серии. В Белокурихе – четвертичные аллювиально-пролювиальные суглинки. На территории Краснокаменска – делювиальные и делювиально-пролювиальные раннечетвертичные суглинистые отложения.

Методы и материалы

Инструментально определяемым показателем, наиболее достоверно характеризующим потенциальную радоноопасность территории является плотность потока радона с поверхности грунта. В ситуации, когда диффузия рассматривается как единственный механизм переноса радона, ППР описывается выражением:

$$\text{ППР} = C_{Ra} \cdot K_{ЭМ} \cdot \rho \cdot \sqrt{\lambda \cdot D},$$

где: C_{Ra} – удельная активность радия-226 в грунте, Бк/кг; $K_{ЭМ}$ – коэффициент эманирования грунта, отн.ед.; ρ – плотность грунта, кг/м³; λ – постоянная распада радона-222, 1/с; D – объемный коэффициент диффузии.

Значение длины диффузии может быть получено путём решения следующего уравнения:

$$L = \sqrt{D/\lambda},$$

следовательно:

$$L = \frac{\text{ППР}}{C_{Ra} \cdot K_{ЭМ} \cdot \rho \cdot \lambda}$$

Для измерения ППР использовали измерительный комплекс «КАМЕРА-01» (НТЦ «Нитон»). Накопительные колонки НК-32 с активированным углём устанавливали на поверхность грунта в лунки со снятым дерновым слоем и экспонировали в течение 3–5 часов. Далее после снятия НК-32 уголь перемещался в сорбционные колонки СК-13 и выдерживался в течение 4 часов для установления равновесия с дочерними продуктами распада (ДПР) радона. После установления равновесия измеряли активность радона в угле по бета-излучению ДПР на радиометрах БДБ, оснащенных ПО «Radon-98». Общая неопределённость результата не превышает 30%.

C_{Ra} измеряли в пробах грунта на сцинтилляционном гамма-спектрометре МКС-01А «Мультирад-гамма», оснащённом детектором NaI(Tl) 63x63 мм с погрешностью не более 15%. Для определения $K_{ЭМ}$ сначала проводились измерения удельной активности радия-226 в деэманированном состоянии и определялась удельная активность связанного радона в грунте, затем после герметизации в течение 3-х недель и восстановления радиоактивного равновесия между радием-226 и радоном, проводились повторные измерения. $K_{ЭМ}$ определили по формуле:

$$K_{ЭМ} = \frac{C_{Rn}}{C_{Ra}} = \frac{C_{Ra} - C_{Ra}^*}{C_{Ra}}$$

где C_{Rn} – удельная активность свободного радона в грунте, Бк/кг; C_{Ra}^* – удельная активность радия-226 по результатам измерения в деэманированном состоянии, Бк/кг; C_{Ra} – удельная активность радия-226 по результатам повторных измерений в состоянии радиоактивного равновесия с радоном после выдерживания в герметичном сосуде, Бк/кг ($C_{Ra} = C_{Rn} + C_{Ra}^*$).

Измерения ППР с поверхности грунтовых массивов проводили на достаточно большой площади по профилям с расстоянием между точками около 100–200 м. Пробы грунта отбирались из скважин,

глубиной до 1,5 м. Плотность грунта определялась методом режущего кольца. В связи с незначительным количеством определений, усредненные значения плотности грунтов были взяты по литературным данным [6, 7, 9]. Количество измерений ППР и проанализированных проб грунта для каждого грунтового массива приведены в таблице 1.

| <i>Таблица 1</i> | | | |
|--|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Количество измерений радиационных параметров на разных грунтовых массивах | | | |
| Территория | Тип грунта | Кол-во измерений ППР | Кол-во проб грунта |
| Пятигорск | Майкопские глины | 18 | 4 |
| Пятигорск | Просадочные лессовидные суглинки | 20 | 7 |
| Белокуриха | Аллювиально-пролювиальные суглинки | 118 | 21 |
| Краснокаменск | Делювиально-пролювиальные суглинки | 95 | 25 |

Результаты и обсуждение

В таблице 2 представлены результаты измерения ППР и удельной активности радия-226, свойств грунтов, а также определения коэффициента диффузии и длины диффузии радона в грунтах.

| <i>Таблица 2</i> | | | | | | | |
|--|------------------------------|--|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--|--------------------------|
| Результаты измерений и оценки параметров диффузионного переноса радона в грунтовых массивах | | | | | | | |
| Тип грунта | Кол-во осадков мм/год | ρ, кг/м³ | ППР, мБк/м²·с | C_{Ra}, Бк/кг | КЭМ, отн.ед | $D \cdot 10^{-6}$, м²/с | L, м |
| Майкопские глины (Пятигорск) | 518 | 2100 | $\frac{149}{93-205}$ | $\frac{78,8}{69,8-87,8}$ | 0,35 | $3,02 \cdot 10^{-6}$ | 1,2 |
| Просадочные суглинки (Пятигорск) | 518 | 1885 | $\frac{147}{112-182}$ | $\frac{59,1}{46,1-72,1}$ | 0,33 | $7,58 \cdot 10^{-6}$ | 1,9 |
| Аллювиально-пролювиальные суглинки (Белокуриха) | 700 | 1680 | $\frac{59}{38-80}$ | $\frac{37,8}{30,9-44,7}$ | 0,35 | $4,12 \cdot 10^{-6}$ | 1,4 |
| Делювиально-пролювиальные суглинки (Краснокаменск) | 300 | 1920 | $\frac{116}{96-136}$ | $\frac{37,4}{35,0-39,8}$ | 0,32 | $1,3 \cdot 10^{-5}$ | 2,5 |

Примечание: в числителе – среднеарифметическое; в знаменателе – доверительный интервал (при $p=0,95$: нижняя граница – верхняя граница)

Полученные значения D и L с известным диапазоном значений параметров переноса радона в рыхлых песчано-глинистых отложениях [2, 8]. Это свидетельствует о верности нашего предположения о преобладании диффузионного переноса в исследуемых глинистых массивах.

Майкопские глины, которыми сложена значительная часть территория Пятигорска обладают наименьшей длиной диффузии, относительно других рассматриваемых грунтовых массивов. Это связано, по-видимому, с тем, что майкопские глины являются плотными местами аргиллитоподобными образованиями, обладающими наибольшей плотностью и наименьшей проницаемостью по сравнению с другими исследованными массивами грунтов. Вместе с тем, эти глины характеризуется наиболее высокими значениями C_{Ra} и, соответственно, ППР. Покровные просадочные лессоподобные суглинки, распространенные в Пятигорске на поверхности III террасы р. Подкумок, характеризуются существенно большей длиной диффузии радона, что связано, по-видимому, с меньшей плотностью, большей пористостью и проницаемостью данных отложений. За счет значительной длины диффузии радона в этих отложениях, они характеризуются повышенными значениями ППР, сопоставимыми с майкопской глиной, при меньшей удельной активности радия.

На территории г. Белокуриха Алтайского края четвертичные аллювиально-пролювиальные суглинки при достаточно низкой плотности и высокой пористости характеризуется относительно низкой длиной диффузии радона (1,4 м), т.к. г. Белокуриха находится в зоне более интенсивного увлажнения грунтов, что связано с наибольшим годовым количеством осадков на данной территории. Повышенная влажность грунтов (степень заполнения пор водой) приводит к существенному снижению коэффициента диффузии и длины диффузии радона в грунтах [2]. При относительно низких значениях C_{Ra} , территория характеризуется наименьшими значениями ППР по сравнению с другими обследованными грунтовыми массивами.

Интересно, что наиболее высокие значения параметров переноса радона характерны для делювиальных и делювиально-пролювиальных суглинков, которыми сложена территория г. Краснокаменска. Значение длины диффузии радона в суглинках 2,5 м близко к максимально возможному, т.к. сопоставимо с длиной диффузии радона в воздухе. Причиной столькой значительной длины диффузии, по-видимому, является высокая проницаемость приповерхностных грунтов в условиях дефицита влаги в степной зоне (годовое количество осадков не превышает 300 мм). Это обуславливает относительно высокие (стабильно выше нормируемого уровня 80 мБк/м²с) значения плотности потока радона с поверхности грунта.

Заключение

Предложен простой и в то же время достаточно надежный метод оценки параметров переноса радона (D и L) в массивах грунтов в условиях преобладания диффузионного переноса радона. Определены значения коэффициентов диффузии и длины диффузии радона в массивах глинистых грунтов, расположенных в разных регионах России, характеризующихся повышенной радоноопасностью. Наибольшими значениями параметров диффузионного переноса радона характеризуются наиболее проницаемые делювиально-пролювиальные лессовидные отложения, распространенные в степной аридной зоне. Для уплотненных глин, а также суглинков в зоне повышенного увлажнения, получены ожидаемо более низкие значения коэффициентов диффузии и длины диффузии радона. Предложенный метод может быть успешно использован в ходе оценки потенциальной радоноопасности территорий.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. Грант № 24-17-00217

Литература

1. Castaño-Casco E., Gutiérrez-Álvarez I., Barba-Lobo A., Bolívar J.P. Development of a robust and precise methodology for the measurement of the radon diffusion coefficient in diverse materials. *Construction and Building Materials*, 440, 2024, 137402.
2. Huynh Nguyen Phong Thu, Nguyen Van Thang, Le Cong Hao. The effects of some soil characteristics on radon emanation and diffusion. *Journal of Environmental Radioactivity*, 216, 2020, 106189.
3. Joshi A., Panwar P., Prasad M., Singh K. P., Singh P., Sharma N., Ramola R.C. Assessment of soil gas radon migration and transport through the estimation of radon diffusion length and diffusion coefficient in the soil matrix. *Nuclear Engineering and Technology*, 2024, 103305, <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.11.007>.
4. Ryzhakova N. K. A new method for estimating the coefficients of diffusion and emanation of radon in the soil. *Journal of Environmental Radioactivity*, 135, 2014, 63-66.
5. Tsapalov A., Gulabyants L., Livshits M., Kovler K. New method and installation for rapid determination of radon diffusion coefficient in various materials. *J. Environ. Radioact.*, 130 (2014), pp. 7-14
6. *Инженерная геология СССР. Алтае-Саянский и Забайкальский регионы/ Голодковская Г.А., Розенберг Л.И., Шевченко В.К. Недра, М.: 1990. – 375 с*
7. *Инженерная геология СССР. В 8-ми томах. Том 8. Кавказ, Крым, Карпаты. Изд-во МГУ, М.: 1978. – 366 с.*
8. Калайдо А.В. Модельное исследование процесса переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание». Диссер. на соиск. уч.степ. канд. техн. наук. Специальность 05.23.19. НИИСФ РААСН Минстроя России. 2017, 131 с.
9. Щецов А.Я. *Природные условия Алтайского края/ Барнаул: Изд-во «Новый формат», 2021. – 178 с.*
10. Яковлева В.С. Полевой метод измерения коэффициента диффузии радона и торона в грунте// *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2014. № 1 (8). С. 81-85.*

ЛИТОТОПЫ КАК ЖИЗНЕОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ РЕСУРС ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.А. Королев¹, В.Т. Трофимов¹, А.Н. Галкин²

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

² Витебский государственный университет им. П.М. Машерова, 210038, Белоруссия, г. Витебск, Московский пр-кт, д. 33

E-mail: va-korolev@bk.ru, trofimov@rector.msu.ru, galkin-alexandr@yandex.ru

Под эколого-геологической системой (ЭГС) понимают открытую динамичную систему, включающую подсистемные блоки: абиотический (литотоп), биокосный (эдафотоп), биотический (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз, человеческое сообщество - социум), а также источники природных и техногенных воздействий, тесно связанные прямыми и обратными причинно-следственными связями, обуславливающими ее структурно-функциональное единство [15]. ЭГС представляет собой основной объект исследований экологической геологии [16].

В структуре любой ЭГС определяющую роль играет ее основной абиотический компонент – *литотоп*, представляющий собой геологическое пространство эколого-геологической системы и входящий в состав её биотопа. Он может быть образован массивами грунтов различного состава (от скальных [14] до дисперсных [2-11]), состояния (талые или мерзлые [13]) и строения, обуславливая широкое разнообразие как природных, так и техногенных эколого-геологических систем. Их общая систематика была предложена нами в ряде работ [1,12,15]. Положение литотопа в общей структуре природных ЭГС показано на рис.1.

Исходя из структуры природной ЭГС [15,16] компонентами литотопа являются (см. рис.1): 1 – массивы грунтов (грунтовые толщи), представляющие собой литогенную основу для данной ЭГС; 2 – рельеф территории литотопа; 3 – подземные воды, входящие в состав гидротопы данной ЭГС; 4 – геохимические поля, формирующие геохимические потоки и аномалии; 5 – геодинамические поля, определяющие наличие геодинамических процессов; 6 – геофизические поля, определяющие геофизическую экологическую функцию.

Все указанные компоненты литотопа могут быть как природными, так и техногенными. В последнем случае они определяют степень техногенной трансформации как литотопа, так и всей ЭГС в целом, которая в зависимости от техногенной измененности, может быть техно-природной (изменена на менее чем 50%), природно-техногенной (изменена >50%), либо антропогенной (полностью искусственно созданной).

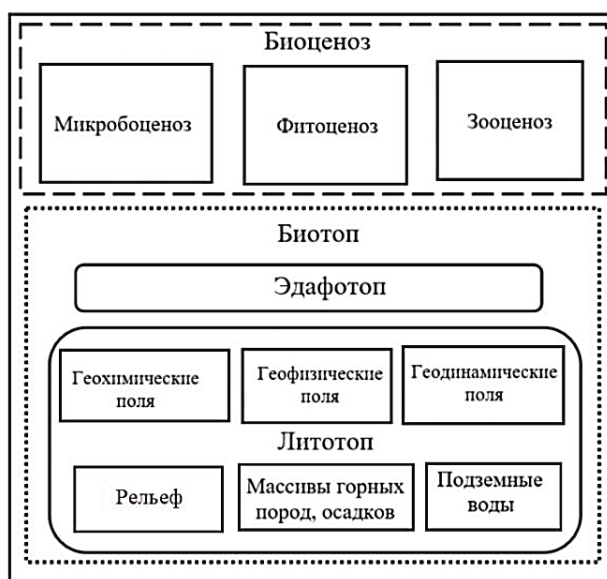


Рис. 1. Модель структуры природной сухопутной эколого-геологической системы

Как известно ресурсная экологическая функция литосферы определяет роль минеральных, органических и органоминеральных ресурсов и геологического пространства литосферы для жизни и деятельности биоты как в качестве биогеоценоза, так и человеческого сообщества [16]. Это обуславливает лидирующее, базовое положение ресурсной экологической функции литосферы по отношению к другим её экологическим функциям: геохимической, геодинамической и геофизической. Она не только определяет комфортность проживания биоты, но и саму возможность ее существования и развития в данных условиях. При этом ведущая роль в реализации этой функции принадлежит именно литотопу.

К экологическим свойствам литотопов, реализующим ресурсную экологическую функцию литосферы, относятся:

1. Состав и содержание минеральных, органических, органоминеральных ресурсов, необходимых для биоты и человеческого сообщества.

2. Состав и содержание элементов биофильного ряда, необходимых для биоты.

3. Способность литосферы к созданию возобновляемых запасов подземных вод, используемых биотой и человеком.

4. Пространственная (площадная и объемная) емкость геологического пространства, обеспечивающая расселение и существование живых организмов и развитие человеческой цивилизации.

5. Качество территориального ресурса применительно к разным видам его освоения и обживания, обусловленное вещественными и энергетическими параметрами литосферы.

Исходя из этого, литотоп играет определяющую роль в формировании и функционировании природных ЭГС по следующим причинам:

1. Он обеспечивает ресурс геологического пространства для биоты, обитающей (временно или постоянно) в грунтовой толще.

2. Он обуславливает питательные и энергетические ресурсы для микробных сообществ и отчасти для макроорганизмов, обитающих в грунтах.

3. На поверхности литотопа формируется соответствующий ему *эдафотоп*, обуславливающий почвенное плодородие, ресурс почвенного пространства для биоты, питательные и энергетические ресурсы для микро- и макроорганизмов (лишайников, грибов, растений, животных).

4. От особенностей литотопа (генетических, литолого-петрографических, химико-минеральных, структурно-текстурных, термо-влажностных и др.) зависят состав и характеристики всех биотических компонентов - микробо-, фито- и зооценозов, развивающихся в пределах данной ЭГС. Так, например, на литотопах массивов скальных грунтов формируются фитоценозы, представленные лишайниками-эпилитами и растениями петрофитами [14]; на литотопах массивов крупнообломочных грунтов фитоценозы представлены растениями-хазмофитами и накипными лишайниками [4,5]; на литотопах массивов песчаных грунтов – растениями-псаммофитами [2,6,7,9]; на литотопах массивов лёссовых [3,10,11] и глинистых [8] грунтов - растениями-пелитофитами; на литотопах массивов засоленных грунтов – растениями-галофитами, солеросами [3]; на литотопах массивов торфяных и заторфованных грунтов – растениями геолфитами и т.п.

5. Литотоп тесным образом связан с особенностями *рельефа* в границах конкретной ЭГС (тип рельефа, расчлененность и т.п.). Они в свою очередь определяют состав и структурой грунтового массива, а с другой стороны – влияют на тепло-влагообеспеченность в ЭГС.

6. Литотоп обуславливает тип и характер влагообеспеченности эколого-геологической системы, особенности *подземных вод*, как части гидротопы, формирующих водный ресурс, необходимый для существования биоты.

На техногенно-освоенных территориях литотоп выполняет те же роли, что и перечислены выше для природных ЭГС, но дополнительно у него появляются функции жизнеобеспечения для человека (социума), которые формируют:

- 1) ресурсы геологического пространства (вместилище для подземных сооружений разных типов и назначения, места складирования и захоронения отходов и др.), необходимые для жизнедеятельности человека;

- 2) ресурсы полезных ископаемых (минерально-сырьевые), необходимые для человеческого общества как социоструктуры, включают четыре основных категории минеральных ресурсов: черные и легирующие металлы, цветные металлы, неметаллические полезные ископаемые, подземные воды.

- 3) топливно-энергетические ресурсы (нефть, газ, каменный уголь, торф, горючие сланцы и др.).

Кроме того, ведущая роль литотопа в формировании ЭГС, обусловлена еще и особенностями геодинамических, геохимических и геофизических полей, развитых в ее пределах. Это обуславливает реализацию экологической геодинамической, геохимической и геофизической функций, соответственно.

При этом, *геодинамическое поле* в пределах природных ЭГС формирует характерный парагенез эндогенных и экзогенных геологических процессов, особенности которых обусловлены типом и свойствами данного литотопа. Так, например, для литотопов массивов скальных грунтов будут прежде всего характерны такие геодинамические процессы как обвалы, осыпи, каменные лавины, выветривание, а для литотопов массивов дисперсных грунтов – склоновая эрозия, оползни, сели, сплывы и т.п.

Геохимическое поле литотопа в пределах природных ЭГС формирует процессы миграции химических элементов, образование или разрушение геохимических барьеров и геохимических аномалий. Функциональными территориальными (точнее, объемными) единицами эколого-геохимических исследований литотопа являются геохимические зоны, геохимические провинции и геохимические аномалии, которые могут быть объединены под общим названием «геохимические неоднородности литотопа» и которые обусловлены как повышенным содержанием элементов относительно фона, так и пониженным их содержанием по сравнению с фоновым.

При этом на техногенно-освоенных территориях в сферу изучения геохимических полей литотопа в первую очередь попадают вопросы медико-санитарного изучения ЭГС, а также преимущественно те геохимические неоднородности литотопа, которые представляют потенциальную опасность или, наоборот, обеспечивают наибольшую комфортабельность жизнедеятельности биоты, в т.ч. и человека как биологического вида. По сути, именно этим определяется и круг решаемых в рамках изучения геохимической функции литосферы задач.

Геофизическое поле литотопа в пределах природных ЭГС отражает свойство природных и техногенных геофизических полей данного грунтового массива влиять на состояние биоты и здоровье человека. Эту функцию следует понимать также как «способность» литотопа обеспечивать и поддерживать на поверхности Земли и в приповерхностной ее части энергетические условия, пригодные для существования живых организмов. При этом из геофизических полей литотопа наибольшее жизнеобеспечивающее значение имеют поля температуры, силы тяжести и радиационное. Именно их сочетание в определенных пределах создает необходимые условия для существования и развития биоты, а также человеческого сообщества. В целом же геодинамические, геохимические и геофизические поля в грунтовых массивах литотопа должны рассматриваться как система, как единое целое вместе с другими компонентами литотопа.

Из вышеизложенного следует, что именно литотоп, как ведущий фактор формирования ЭГС, должен является основой для систематизации и классифицирования как природных, так и техногенных эколого-геологических систем. Этот методологический принцип и был реализован авторами в ряде работ по систематике ЭГС [1,12].

Таким образом, можно заключить, что:

1. Именно литотоп является важнейшим жизнеобеспечивающим компонентом как природных, так и техногенно измененных эколого-геологических систем.
2. Особенности конкретного литотопа обеспечивают реализацию всех экологических функций: ресурсной, геодинамической, геохимической и геофизической.
3. Литотоп, как литогенная основа любой эколого-геологической системы, определяет специфические черты и состав ее основных биокосных и абиотических компонентов: микро-, фито- и зооценоза.
4. Определяющая роль литотопа в ЭГС позволяет обоснованно подходить к вопросам систематизации и классифицирования различных эколого-геологических систем.

Литература

1. Галкин А. Н., Королёв В. А. Классификация эколого-геологических систем Беларуси на основе учета особенностей литотопов и инженерно-хозяйственных объектов // *Литасфера*. 2023. Т. 58, № 1. С. 99–110
2. Королёв В. А. Особенности эколого-геологической системы Арчединско-Донских песков // *Экосистемы*. 2023. № 35. С. 138–154.

3. Королёв В. А. Эколого-геологические системы массивов лёссовых грунтов Таджикистана // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в г. Душанбе. Серия естественных наук. 2023. Т. 1, № 3. С. 97–107
4. Королёв В. А. Эколого-геологические системы массивов крупнообломочных грунтов бассейна реки Ирикчат (Кабардино-Балкария) // ГеоИнфо. 2023. № 5. С. 6–16.
5. Королёв В. А. Особенности эколого-геологических систем массивов крупнообломочных грунтов // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2024. Т. 27, № 1. С. 67–82
6. Королёв В. А., Балькова С. Д. Эколого-геологические системы тукуланов // Инженерная геология. 2023. № 3. С. 22–35.
7. Королёв В. А., Балькова С. Д. Эколого-геологические системы тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр (Якутия) // Экосистемы. 2023. № 35. С. 82–102
8. Королёв В. А., Галкин А. Н. Особенности природных эколого-геологических систем массивов глинистых грунтов Белоруссии // Электронный журнал ГеоИнфо. 2023. № 9/10. С. 12–21
9. Королёв В. А., Галкин А. Н. Природные эколого-геологические системы массивов песчаных грунтов Белоруссии // Инженерная геология. 2023. Т. 18, № 4. С. 38–49.
10. Королёв В. А., Галкин А. Н. Особенности эколого-геологических систем лёссовых грунтов Белоруссии // Электронный журнал ГеоИнфо. 2024. № 1/2. С. 48–62
11. Королев В. А., Григорьева И. Ю. Эколого-геологические системы массивов лесовых грунтов // Инженерная геология. 2022. Т. 17, № 2. С. 42–64.
12. Королёв В.А., Трофимов В.Т. К построению общей классификации континентальных эколого-геологических систем. // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2022. № 1. С. 54–61.
13. Королев В. А., Трофимов В. Т., Васильчук Ю. К. Эколого-геологические системы массивов мерзлых грунтов и их особенности // Инженерная геология. 2023. Т. 18, № 1. С. 52–67.
14. Королёв В. А., Трофимов В. Т., Харьковина М. А. Особенности эколого-геологических систем массивов скальных грунтов // ГеоИнфо. 2023. № 2. С. 6–17.
15. Трофимов В.И. Эколого-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы // Вестник Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 2009, №2. С. 48-52.
16. Трофимов В. Т. Эколого-геологическая система – объект эколого-геологических исследований // Экологические проблемы недропользования. Наука и образование. / Мат-лы. 5-й Междунар. науч. конф. 19–24 ноября 2012 г. СПб: СПбГУ. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. С. 288–291.

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМАХ ВОДА-ГРУНТ НА УЧАСТКАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И.А. Костикова¹, И.В. Галицкая¹, Е.А. Старостин²

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2

² Государственный университет «Дубна», 141980, г. Дубна, ул. Университетская, 19

E-mail: galgeoenv@mail.ru, kostiran@yandex.ru

В современный период обеспечение экологической безопасности на участках размещения полигонов ТКО относится к одной из наиболее актуальных проблем. Значительное внимание уделяется изучению загрязнения подземных вод и грунтов на участках расположения свалок; поведения химических элементов в свалочных телах; деградации органического вещества свалок, его влиянию на миграцию химических веществ; долгосрочности эмиссий свалочных тел, роли грунтов как вторичного источника загрязнения подземных вод. Существенный интерес проявляется к исследованию взаимодействия грунт-раствор как в свалочном теле, так и на прилегающих участках.

Целью рассматриваемых в данной статье исследований является изучение взаимодействия в системах «свалочный грунт-фильтрат» и «грунты -атмосферные осадки» на территории расположения полигонов ТКО с использованием термодинамического моделирования..

В качестве объектов исследования выбраны полигоны ТКО, расположенные в Московской области.

Термодинамическое моделирование выполнялось с использованием программы PHREEQC version 3.7.0 [2]. База данных термодинамических параметров принималась используемой в PHREEQC по умолчанию.

Моделирование взаимодействия атмосферной воды и минералов верхнего слоя грунтов

Объект исследования – полигон ТКО, расположенный в Дмитровском районе московской области.

Исследования включали определение химического и минерального состава термодинамического моделирование. Минеральный состав проб представлен в таблице 1.

Перечень исследуемых элементов в верхнем слое грунтов включал: барий, кальций, цезий, магний, кремний, йод, теллур, хлор, калий, фосфор, железо, вольфрам, алюминий, марганец, сера, редкоземельные элементы (церий, празеодим, неодим), в водах – Ва, Са, Cs, Mg, Si, Те, Cl, К, Се, Pr, Nd, P, Fe, W, Al, Mn, S. Химико-аналитическое исследование проб проводилось А.В. Грачевой с использованием методов рентгеноструктурного и рентгеноспектрального флуоресцентного анализа.

| <i>Таблица 1</i> | | | | | | | |
|---|--|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Минеральный состав (непрокаленные образцы) | | | | | | | |
| Пункт отбора | Минеральный состав (непрокаленные образцы) | | | | | | |
| | Кварц | Альбит | Ортоклаз | Микроклин | Сильвин | Хлорит | Кальцит |
| Юг 5м | 81.10 | 7.30 | 0.00 | 11.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| QIP1 | 74.50 | 18.20 | 0.00 | 5.90 | 0.00 | 0.00 | 1.40 |
| Юг 5 м | 92.30 | 5.50 | 2.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Восток300 м | 95.40 | 4.30 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 |
| Север 100 м | 85.20 | 5.50 | 2.60 | 0.00 | 0.00 | 6.70 | 0.00 |
| Юг 50 м | 85.00 | 7.10 | 0.00 | 7.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Юг 200 м | 82.90 | 6.90 | 0.00 | 10.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Запад 100м | 88.40 | 6.10 | 0.00 | 5.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Север 300 м | 86.20 | 7.30 | 0.00 | 6.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| <i>среднее</i> | <i>85.67</i> | <i>7.58</i> | <i>0.54</i> | <i>5.26</i> | <i>0.03</i> | <i>0.74</i> | <i>0.16</i> |
| <i>максимум</i> | <i>95.40</i> | <i>18.20</i> | <i>2.60</i> | <i>11.50</i> | <i>0.30</i> | <i>6.70</i> | <i>1.40</i> |
| <i>минимум</i> | <i>74.50</i> | <i>4.30</i> | <i>0.00</i> | <i>0.00</i> | <i>0.00</i> | <i>0.00</i> | <i>0.00</i> |

Рассмотрена термодинамическая модель взаимодействия атмосферной воды и минералов верхнего слоя грунтов.

Вес твёрдой фазы был оценен для участка площадью 1 м² и глубиной 0,2 см (глубина отбора почвенных проб), плотности почвы 1,2 г/см³ и пористости 0,4. Таким образом вес твердой фазы составил примерно 144 кг. Количество вещества, вступающее в реакцию растворения, рассчитано для каждого минерала умножением среднего значения его содержание в пробах на 144 кг. Исходные данные по минеральному веществу приведены в таблице 2.

| Таблица 2 | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------|--------|-------|---------|---------|
| Входные данные расчета (твердая фаза) | | | | | |
| Минерал | Формула | г/моль | % | кг | моль |
| Альбит | NaAlSi3O8 | 261 | 7.58 | 10.9152 | 41.82 |
| Кальцит | CaCO3 | 100 | 0.16 | 0.2304 | 2.304 |
| Хлорит | Mg5Al2Si3O10(OH)8 | 555.7 | 0.74 | 1.0656 | 1.92 |
| Ортоклаз/Микроклин | KAlSi3O8 | 278 | 5.8 | 8.352 | 30.04 |
| Кварц | SiO2 | 60.083 | 85.67 | 123.364 | 2053.24 |
| Сильвин | KCl | 74.55 | 0.03 | 0.0432 | 0.58 |

Количество атмосферной воды, вступающей в реакцию, было принято равной годовой величине инфильтрационного питания. При инфильтрационном питании 80 мм/год на участок площадью 1 м² приходится 80 л воды. Для определения чистого водного раствора используются только pH и температура. По условиям, заданным в расчете, каждый минерал вступает в реакцию либо до достижения равновесия (индекс насыщения равен 0,0), либо до тех пор, пока он не будет исчерпан в смеси. Расчет проводился в диапазоне температур от 0 до 35 °C с шагом 5 C и для двух значений pH – 7 и 5.5. Рассчитанные индексы насыщения приведены на рисунке 1.

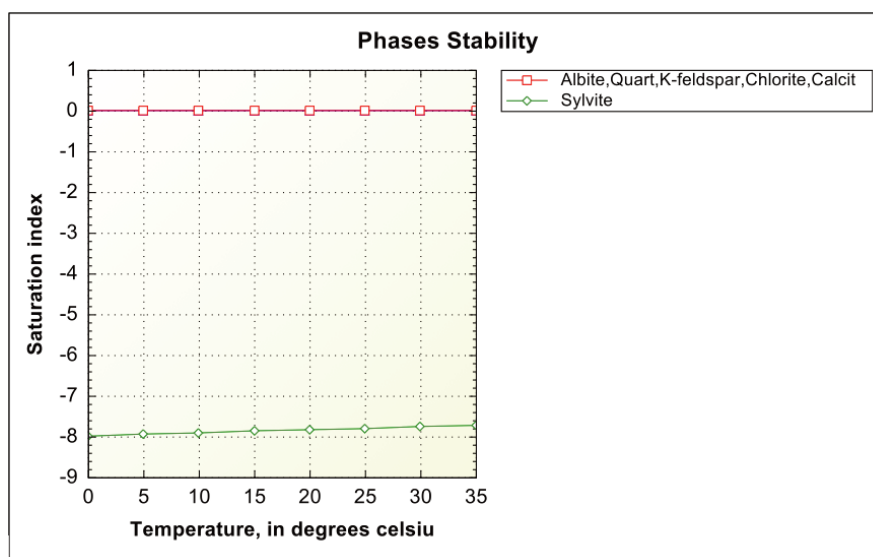


Рис. 1. Индекс насыщения минералов в растворе в диапазоне температур от 0 до 35 °C

Расчеты показали, что стабильными фазами являются альбит, кварц, хлорит, ортоклаз, микроклин, кальцит (индекс насыщения равен 0,0), нестабильной – сильвин. Для достижения равновесия альбиту, кварцу, хлориту, ортоклазу, микроклину достаточно перехода в раствор очень небольшого количества вещества, сильвин переходит в раствор всем количеством и не достигает равновесия (таблица 3).

Минеральный состав грунтов, количественное соотношение минералов, с преобладанием слабо растворимых, свидетельствует о том, что грунты имеют естественное природное состояние мине-

рального состава. Единственным исключением, по-видимому, является сильвин. Однако он найден лишь в одной пробе из девяти и в незначительном количестве.

В пробах, кроме минералов определялся компонентный химический состав. Химические элементы могут быть как включениями в минералы, так и сорбированными техногенными примесями. Сорбция и другие физико-химические процессы не рассматривались в рамках данной модели.

Для изучения процессов сорбции-десорбции и оценки грунтов зоны аэрации как вторичного источника загрязнения подземных вод на участках расположения полигонов ТКО перспективным является подход, заключающийся в моделирование влаго- и массопереноса (прогноз концентраций, поступающих на уровень грунтовых вод в заданные периоды времени, и в разрезе зоны аэрации).

Пример использования данного подхода, заключающегося в моделирования влаго- и массопереноса в зоне аэрации на полигоне ТКО «Кучино» представлен в [1].

| <i>Таблица 3</i> | | | | | |
|--|---------------------------------------|--|---------------------|---------------------|--------------------|
| Фазовый состав системы при pH 7 и 5.5 при температуре 0, 10, 20 и 30 °С | | | | | |
| Минерал | Входящее кол-во вещества, моль | Количество вещества, перешедшее в раствор | | | |
| | | pH=7 | | | |
| | | T=0 | T=10 | T=20 | T=30 |
| | | моль % | моль % | моль % | моль % |
| Альбит | 4.200E+01 | -5.991E-01 -1.426 | -5.988E-01 -1.426 | -5.984E-01 -1.425 | -5.98E-01 -1.424 |
| Кальцит | 2.300E+00 | -1.184E-02 -0.515 | -1.300E-02 -0.565 | -1.407E-02 -0.612 | -1.51E-02 -0.655 |
| Хлорит(14А) | 1.900E+00 | -7.007E-07 0.000 | -5.888E-07 0.000 | -4.960E-07 0.000 | -4.19E-07 0.000 |
| К-полевоы шпат | 3.000E+01 | 5.991E-01 1.997 | 5.988E-01 1.996 | 5.984E-01 1.995 | 5.98E-01 1.993 |
| Кварц | 2.053E+03 | -1.123E-04 0.000 | -1.402E-04 0.000 | -1.718E-04 0.000 | -2.08E-04 0.000 |
| Сильвин | 6.000E-01 | -6.000E-01 -100.000 | -6.000E-01 -100.000 | -6.000E-01 -100.000 | -6.00E-01 -100.000 |
| Минерал | Входящее кол-во вещества, моль | pH=5.5 | | | |
| | | T=0 | T=10 | T=20 | T=30 |
| | | моль % | моль % | моль % | моль % |
| | | Альбит | 4.200E+01 | -5.991E-01 -1.426 | -5.988E-01 -1.426 |
| Кальцит | 2.300E+00 | -1.192E-02 -0.518 | -1.307E-02 -0.568 | -1.415E-02 -0.615 | -1.514E-02 -0.658 |
| Хлорит(14А) | 1.900E+00 | -7.162E-07 0.000 | -5.997E-07 0.000 | -5.039E-07 0.000 | -4.251E-07 0.000 |
| К-полевоы шпат | 3.000E+01 | 5.991E-01 1.997 | 5.988E-01 1.996 | 5.984E-01 1.995 | 5.979E-01 1.993 |
| Кварц | 2.053E+03 | -1.113E-04 0.000 | -1.392E-04 0.000 | 5.984E-01 0.029 | -2.070E-04 0.000 |
| Сильвин | 6.000E-01 | -6.000E-01 -100.000 | -6.000E-01 -100.000 | -6.000E-01 -100.000 | -6.00E-01 -100.000 |

Термодинамическое моделирование геохимической системы фильтрат – грунтовые воды

Объект исследования – полигон ТКО, расположенный на территории Богородского района Московской области.

На модели исследовались диагенетические реакции, которые могут происходить в зонах, где свалочный фильтрат смешивается с грунтовыми водами. Фильтрат, образовавшийся в теле полигона,

мигрирует вниз в виде шлейфа, смешиваясь с подземными водами. По мере миграции фильтрата происходит серия окислительно-восстановительных реакций (метаногенез, восстановление сульфата, восстановление железа и марганца, денитрификация, осаждение карбонатов).

Выполнена имитационная модель, представляющая серию геохимических эмуляций:

(А) Свалочный фильтрат определяется с использованием данных по основным ионам, приведённым в таблице 4. Окислительно-восстановительный потенциал фильтрата принимается равным -170 мВ, что соответствует парциальному давлению кислорода 10^{-66} бар.

(В) Грунтовые воды определяются с использованием данных по основным ионам, приведённым в таблице 5. Окислительно-восстановительный потенциал грунтовых вод принимается равным +470 мВ, что соответствует парциальному давлению кислорода 10^{-25} бар.

(С) Два раствора (фильтрат и подземные воды) смешивают вместе в выбранных пропорциях.

Для каждого шага рассчитываются равновесные концентрации элементов в водной фазе и индексы равновесности минералов.

| <i>Таблица 4</i> | | |
|--|---|------------------------------------|
| Химический состав фильтрата на входе на очистные сооружения | | |
| Показатели | SOLUTION 1 _ Фильтрат 06.03.2019 | SOLUTION 2 _грунтовые воды_ |
| Температура, оС | 15 | 15 |
| pH | 8.02 | 7.46 |
| pe | -3 | 8 |
| Плотность | 1 | 1 |
| Щелочность | | 411 |
| Br | | 0.026 |
| Ca | 170 | 90.5 |
| Cd | 0.5 | |
| Cl | 4165.38 | 80 |
| Cu | 0.102 | |
| Fe | 22.91 | 16.68 |
| Li | | 0.02 |
| Mg | 36 | 25.6 |
| Mn | 0.57 | 0.339 |
| N(-3) | 1285.05 | 7.07 |
| N(3) | 0.02 | 0.02 |
| N(5) | 0.37 | 0.1 |
| Na | | 76.3 |
| Pb | 0.488 | |
| S(6) | 263.93 | 59.6 |
| Zn | 0.359 | |
| Si | | 5.508 |

Результаты расчётов индекса неравновесности для основных минералов приведены в таблице 5.

Исходя из допущения, что меньшая степень разбавления достигается за меньшее время, можно предположить, что достаточно быстро из смешанного раствора начинает осажаться железо в форме гётита и сидерита, на следующем этапе карбонаты кальция железа и марганца.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что термодинамические расчеты для сложных геохимических систем, таких как полигоны отходов, могут дать представление только

Таблица 5 Индекс неравновесности минералов по отношению к смеси фильтрата и подземных вод в нескольких пропорциях

| Минерал | | Индекс неравновесности, SI для смешанных растворов в соотношениях «фильтрат к грунтовые воды» | | | |
|------------|-------------------------------------|---|---------|----------|-----------|
| | | 1 к 10 | 1 к 100 | 1 к 1000 | 1 к 10000 |
| Кальцит | CaCO ₃ | -0,12 | 0,35 | 0,56 | 0,59 |
| Доломит | CaMg(CO ₃) ₂ | -0,49 | 0,45 | 0,89 | 0,94 |
| Гетит | FeOОН | 0,09 | 1,57 | 2,14 | 2,21 |
| Fe(OH)3(a) | Fe(OH)3(a) | -5,44 | -3,96 | -3,38 | -3,31 |
| Сидерит | FeCO ₃ | 0,47 | 1,48 | 1,83 | 1,87 |
| Манганит | MnOОН | -13,51 | -12,61 | -12,26 | -12,20 |
| Пирохлорит | Mn(OH)2 | -6,75 | -6,06 | -5,70 | -5,65 |
| Родохрозит | MnCO ₃ | -0,16 | 0,24 | 0,41 | 0,43 |

о важнейших химических свойствах системы и тенденциях её развития. Сложность в применении данного метода заключается в основном в параметрическом обеспечении.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-17-00045.

Литература

1. Галицкая И.В., Костикова И.А., Позднякова И.А., Путилина В.С., Юганова Т.И. Долгосрочное влияние полигонов твердых коммунальных отходов на трансформацию. Вестник РФФИ /№3-4 (119-120) с.11-31.
2. Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., 1999, User's guide to PHREEQC (Version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 310 p.

ДИНАМИКА ИЗЛИВОВ КИСЛЫХ ШАХТНЫХ ВОД УГЛЕНОСНОГО МАССИВА ПОСЛЕ ПРЕКРАЩЕНИЯ ЕГО РАЗРАБОТКИ

**Н.Г. Максимович¹, А.А. Мизев¹, О.А. Березина¹, О.Ю. Мещерякова¹,
И.В. Китаева¹, А.Д. Деменев¹, А.Н. Барышников²**

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15

² ООО ««Лаборатория Неразрушающего Контроля», г. Пермь, ул. Революции, 12

E-mail: nmax@psu.ru, artem.mizev@bk.ru, berezina.olga16@gmail.com, olgam.psu@gmail.com, kitaeva03@mail.ru, demenevarten@gmail.com, info@loggers.ru

Разработка угленосных массивов ведет к серьезным нарушениям гидрогеологических условий. При ликвидации шахт «мокрым» способом в ряде случаев начинаются изливы вод на поверхность. Рассмотрим особенности изливов на примере Кизеловского угольного бассейна.

Кизеловский угольный бассейн расположен в восточной части Пермского края. Его территория представляет собой узкую полосу, которая простирается вдоль западного склона Урала. Общая площадь бассейна составляет примерно 1500 км² [5].

Ликвидация шахт Кизеловского угольного бассейна (КУБ), завершившаяся в начале 2000-х годов, не привела к решению экологических проблем. Восстановление уровня подземных вод стало причиной появления изливов (рис. 1) кислых шахтных вод (КШВ), объем которых в среднем составляет 22 млн. м³/год. Их химический состав характеризуется высоким содержанием железа, алюминия, марганца, бериллия и других элементов, концентрации которых в сотни и тысячи раз превышают предельно допустимые концентрации. При попадании кислых шахтных вод (рН 2-3) в естественные водотоки наблюдается повышение водородного показателя и образование техногенного осадка, состоящего преимущественно из гидроокислов железа и алюминия с высокой концентрацией микроэлементов. Изливы шахтных вод оказывают выраженное негативное воздействие на водные экосистемы по настоящее время [5].

Проектирование и строительство очистных сооружений, помимо химического состава изливов, в значительной степени осложняется неравномерными объемами КШВ, поступающими в реки-приемники в течение года. В связи с этим в данной работе рассмотрим основные факторы, влияющие на динамику изливов.

В структурно-тектоническом отношении территория КУБа расположена в пределах Западно-Уральской зоны складчатости, прилегающей к Предуральскому краевому прогибу. Складки осложнены множеством разрывных нарушений, большинство из которых имеет простирание, согласное с простиранием складчатости [2].

В геологической структуре бассейна участвуют осадочные породы палеозойского возраста от нижнего девона до артинского яруса нижней перми. Породы представлены песчаниками, аргиллитами, известняками, сланцами, углем, суглинками и др. Карбонатные породы сильно закарстованы, особенно в верхней части разреза. Четвертичные отложения представлены преимущественно песками, суглинками, глинами, с большим содержанием гравия. Угленосная толща, сложенная кварцевыми песчаниками, глинистыми сланцами, глинистыми песчаниками, известняками, углем, относится к визейскому ярусу нижнего карбона, имеет среднюю мощность от 150 м на Главной Кизеловской антиклинали до 250 м на Гремячинской синклинали [1].

Согласно гидрогеологическому районированию [4], восточная часть Пермского края входит в состав Большеуральского сложного бассейна, характеризующегося корово-блоковыми и пластовыми водами. Подземные воды в бассейне представлены трещинно-карстовыми и трещинно-пластовыми водоносными комплексами. Кроме того, после затопления отработанных шахтных полей в угленосной толще образовался техногенный горизонт шахтных вод [3, 6].

На количество и формирование КШВ оказывают влияние природные условия, которые усложняются последствиями разработки недр, связанных с горными выработками для добычи угля.

Большое количество осадков, в среднем 654-857 мм, относительно небольшая величина испарения 275 мм/год способствуют формированию ярко выраженного гумидного типа климата региона



Рис. 1. Изливы кислых шахтных вод на территории Кизеловского угольного бассейна

и определяют избыточное увлажнение территории [7], большая мощность снежного покрова, небольшая величина промерзания грунтов и продолжительный период таяния снегов – все это благоприятствует накоплению значительных запасов подземных вод.

В обводнении горных выработок активно участвуют трещинно-карстовые воды, находящиеся в кровле угленосной толщи и характеризующиеся значительными статическими запасами, составляющими сотни миллионов кубических метров, их накопление вызвано закарстованностью пород территории. Сложное тектоническое строение и, как следствие, наличие многочисленных разрывных нарушений создаёт гидравлическую связь между водоносными горизонтами, что приводит к значительным водопритокам в шахты. Техногенная трещиноватость, образующаяся в результате обрушения кровли над выработанным пространством шахтных полей, распространяется за пределы угленосной толщи, что приводит к притоку дополнительных объемов подземных вод из надугольного комплекса. Нарушение гидрогеологических условий при разработке месторождения вызвало перераспределение потоков подземных вод и привело к изменению направления и скорости их движения, включая изменения в режиме их циркуляции и уровне водоносных горизонтов.

В настоящее время на территории КУБа зафиксировано 19 изливов кислых шахтных вод. Три из них представляют собой изливающиеся скважины с небольшими расходами, которые не требуют строительства очистных сооружений, их необходимо затампонировать. Сложную экологическую обстановку на территории КУБа в основном определяют 16 изливов, их перечень по типам представлен в таблице 1.

Анализ изменчивости объемов КШВ вод выполнен на основе данных замеров Уральского центра социально-экологического мониторинга углепромышленных территорий с 2007 по 2023 год, где наблюдения проводились при различных условиях питания подземных вод, связанных с сезонами года. Для оценки изменчивости выделены наиболее характерные обобщенные показатели: средние объемы изливов во все климатические периоды за весь анализируемый период – усредненный, но наиболее объективный показатель поступающих на поверхность земли кислых вод; максимальные объемы изливов – показатель экстремально возможных объемов поступления на дневную поверхность загрязненных кислых вод; минимальные объемы изливов позволяют отследить места разгрузки, где объемы шахтных вод могут на некоторое время приближаться к нулю или совсем пре-

кращаться; отношение максимального объема к минимальному за весь анализируемый период позволяет сделать вывод об изменчивости динамики поступления на поверхность шахтных вод.

| <i>Таблица 1</i> | | | |
|---|-------------------|--|--------------------|
| Типы изливов на территории Кизеловского угольного бассейна | | | |
| Изливы | | Название (номер) выработки, откуда происходит излив | Шахта |
| Тип | Количество | | |
| Штольня | 8 | - | им. Володарского |
| | | - | им. Калинина |
| | | - | им. 1 Мая |
| | | - | им. 40 лет Октября |
| | | - | Усьва-3 |
| | | Каменка | им. Чкалова |
| | | Клавдинская | им. Чкалова |
| | | Северная | Таежная |
| Шурф | 4 | 63 | Белый Спой |
| | | 2-бис | Коспашская |
| | | 17 | им. 40 лет Октября |
| | | 56-62 | им. 40 лет Октября |
| Ствол | 3 | Наклонный 8 | им. Ленина |
| | | Главный | им. Ленина |
| | | Наклонный | Нагорная |
| Трубный ходок | 1 | - | им. Крупской |

Анализ средних за анализируемый период расходов шахтных вод показывает, что наибольшие объемы характеризуют 3 излива: шахта им. Калинина, шурф 17 ш. им. 40 лет Октября, Северная штольня ш. Таежная. На долю этих изливов в среднем приходится 19, 20, 21 % от общего среднего объема изливающихся на территории КУБа кислых вод, что в сумме составляет 60 % от общего среднего объема изливов на всей территории. Немного меньшие объемы изливов поступают на поверхность земли из Наклонного ствола 8 ш. им. Ленина (в среднем 14 % от общего объема изливающихся на территории месторождения кислых вод). В остальных точках средние объемы изливов существенно ниже (7,3-0,4 % по отношению к общему среднему объему).

Распределение максимальных объемов изливов по территории месторождения в целом близко к распределению средних объемов. Наибольшие за анализируемый период значения наблюдались в тех же точках: шахта им. Калинина, шурф 17 ш. им. 40 лет Октября, Северная штольня ш. Таежная. Немного ниже максимальные объемы отмечены на изливе из Наклонного ствола 8 ш. им. Ленина и из наклонного ствола ш. Нагорная. Величины наибольших объемов изливов на остальных точках наблюдения изменяются от 472 до 28 м³/час.

Минимальные объемы изливов шахтных вод за анализируемый период в большинстве точек наблюдения изменяются от 0 до 16 м³/час, т.е. иногда изливы отсутствовали, или их объемы были близки к нулю. На этом фоне выделяются величины объемов кислых вод, названных выше изливов: шахта им. Калинина, шурф 17 ш. им. 40 лет Октября, северная штольня ш. Таежная, где даже минимальные расходы шахтных вод составляют 96-259 м³/час.

Объемы изливов, независимо от их размера – крупные, например, из Северной штольни шахты Таежная, так и сравнительно небольшие, – из шурфов 56-62 шахты им. 40 лет Октября, подвержены колебаниям, которые могут быть как незначительными, так и весьма выраженными, что демонстрирует таблица 2. Наибольшие колебания объемов изливающихся шахтных вод зафиксированы из штольни Клавдинская ш. им. Чкалова (от 0,01 до 96 м³/час), при этом средние и максимальные

объемы в данном пункте наблюдений не самые высокие на территории КУБа. Несколько меньше диапазон сезонных колебаний изливов из штольни ш. им. 1 Мая, шурфов 56-62 ш. им. 40 лет Октября, штольни Каменка ш. им. Чкалова, штольни 40 лет Октября. В остальных пунктах наблюдений объемы изливов в разные сезоны года варьируют заметно меньше.

| <i>Таблица 2</i> | | | | |
|---|---|-------|--------|--------------|
| Сезонные колебания расходов шахтных вод (период 2007-2023 годы по данным Уральского центра социально-экологического мониторинга углепромышленных территорий) | | | | |
| Излив | Объемы изливов (Q), м ³ /час | | | |
| | Q сред. | Qмин. | Qмакс. | Qмакс./Qмин. |
| Шахта ш. им. Калинина | 470,6 | 182 | 1558 | 8,6 |
| Шурф 17 ш. им. 40 лет Октября | 506,2 | 96 | 1505 | 15,7 |
| Северная штольня ш. Таежная | 538 | 259 | 1130 | 4,3 |
| Наклонный ствол 8 ш. им. Ленина | 352,7 | 6 | 986 | 164,3 |
| Наклонный ствол ш. Нагорная | 109,4 | 3 | 737 | 245,7 |
| Шурф 2-бис ш. Коспашская | 184,5 | 0,5 | 472 | 944 |
| Штольня ш. им. 1 Мая | 56,7 | 0,1 | 404 | 4040 |
| Шурф 63 ш. Белый Спой | 57,9 | 16 | 376 | 23,5 |
| Штольня ш. Усьва-3 | 99 | 4 | 310 | 77,5 |
| Штольня ш. им. 40 лет Октября | 54,3 | 0,1 | 248 | 2480 |
| Штольня Клавдинская ш. им. Чкалова | 23,9 | 0,01 | 96 | 9600 |
| Штольня ш. им. Володарского | 14,75 | 0,1 | 88 | 880 |
| Главный ствол ш. им. Ленина | 21,4 | 4 | 86 | 21,5 |
| Трубный ходок ш. им. Крупской | 18,2 | 3 | 63 | 21 |
| Шурфы 56-62 ш. им. 40 лет Октября | 9,1 | 0,01 | 41 | 4100 |
| Штольня Каменка ш. им. Чкалова | 10,5 | 0,01 | 28 | 2800 |

Систематизация ключевых показателей средних, максимальных и минимальных объемов разгрузки техногенного горизонта выявила три излива с наибольшими расходами, в том числе по минимальным значениям: шахта им. Калинина, шурф 17 ш. им. 40 лет Октября и Северная штольня ш. Таежная.

Таким образом, анализ данных за период 2007-2023 годы показывает значительные колебания объемов шахтных вод на изливах КУБа, что необходимо учитывать при планировании природоохранных мероприятий. При проектировании очистных сооружений целесообразно объединить изливы, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга. Это позволит оптимизировать их работу, частично сглаживая значительные сезонные колебания объемов кислых шахтных вод.

Литература

1. Гапеев А. А. Твердые горючие ископаемые (каустобиолиты): учебник для геол.-развед. вузов. М.: Госгеолиздат, 1949. 336 с.
2. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 4. М.: Недра, 1967. 476 с.
3. Имайкин А. К., Имайкин К. К. Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений. Перм. гос. нац. иссл. ун-т. Пермь, 2013. 112 с.
4. Изучение режима экзогенных геологических процессов в районах интенсивного хозяйственного освоения: сб. науч. тр. / отв. ред. А. И. Шеко. М.: ВСЕГИНГЕО, 1988. 120 с.
5. Максимович Н. Г., Пьянков С. В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения: монография. Пермь: Пермский гос. национ. иссл. ун-т, 2018. 288 с.

6. Рыбников П. А., Рыбникова Л. С., Максимович Н. Г., Деменев А. Д. Исследование гидрогеологических условий угольных месторождений на постэксплуатационном этапе с использованием гидродинамического моделирования (на примере Кизеловского угольного бассейна, Западный урал, Россия) // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень / MIAВ. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(3-1). – С. 475-487. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-475-487
7. Pyankov, S. V., Maximovich, N. G., Khayrulina, E. A. et al. Monitoring Acid Mine Drainage's Effects on Surface Water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images. *Mine Water Environ*, pp. 1616-1068 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00761-7>.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФАКТОВ НЕБЛАГОПРИЯТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ВБЛИЗИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ

В.Ф. Мочалов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
E-mail: vka@mil.ru

Введение

При проектировании и строительстве железнодорожных путей учитываются последствия взаимодействия массивов грунтов с окружающими элементами ландшафта. Для минимизации возможного неблагоприятного воздействия на окружающую природную среду принимаются во внимание свойства грунта и предусматривается размещение водопропускных сооружений. В ряде случаев по причине низкой производительности водоотводных систем допускается развитие мест подтопления поверхностными водами. Неблагоприятное воздействие поверхностных вод способно привести к деградации железнодорожного полотна и угнетению растительности. На рис. 1 приведены примеры подтопления территорий и усыхания древостоя вблизи железной дороги.

В настоящее время активно развиваются технологии идентификации фактов неблагоприятного воздействия на окружающую среду с помощью автоматизированной обработки материалов мультиспектральной космической съёмки [4].

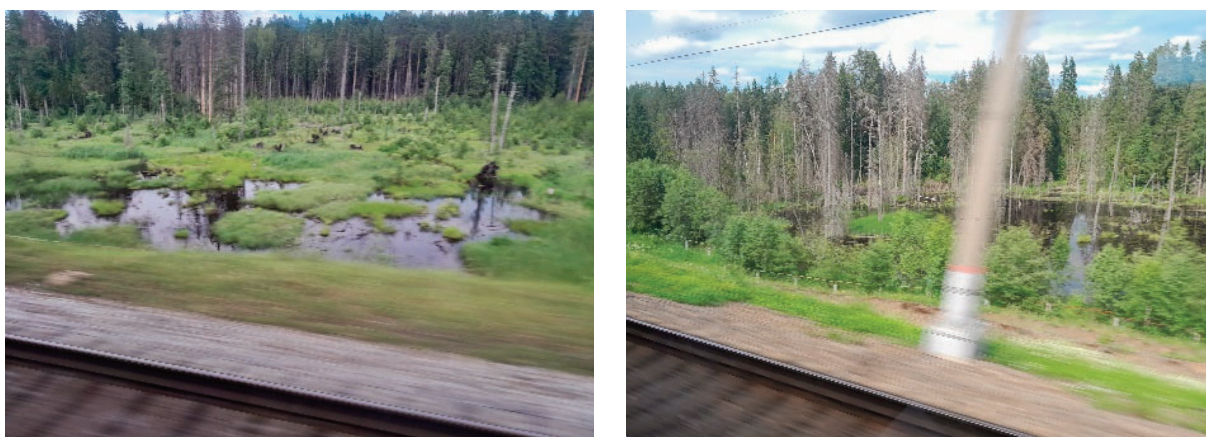


Рис. 1. Примеры фактов неблагоприятного воздействия массивов грунтов

Целью настоящей работы является представление примеров реализации технологии автоматизированной обработки материалов мультиспектральной космической съёмки при идентификации поверхностных вод и усыхающей лесной растительности вблизи железнодорожного полотна.

Основная часть

При реализации технологии обработки выполняются следующие операции:

- выбор территории и проведение наземных обследований на участке местности с известными свойствами грунтов, наличием поверхностных вод, отклонениями в состоянии растительности для последующего формирования исходных данных;
- выбор материалов мультиспектральной космической съёмки на рассматриваемый участок местности;
- формирование обучающей и контрольной выборок для последующего привлечения алгоритмов машинного обучения [2, 3];
- формирование исходных данных и разработка спектрально-яркостных признаков для автоматизированной идентификации элементов ландшафта;
- автоматизированная идентификация мест подтопления и деградации лесной растительности;

- оценивание показателей качества результатов автоматизированной идентификации состояния элементов ландшафта.

Для идентификации фактов неблагоприятного воздействия выбрана территория, на которой размещена эксплуатируемая высокоскоростная железная дорога Санкт-Петербург-Москва.

Подобраны материалы мультиспектральной космической съёмки, выполненной с помощью космического аппарата Sentinel-2 Европейского космического агентства. Условное наименование материалов: S2B_MSIL1C_20170812T092029_N0205_R093_T35VPG_20170812T092026.

Результаты последовательного выполнения операций технологии при идентификации мест подтопления приведены на рисунке 2. Красным контуром на рисунке 2а) выделен фрагмент сцены, на котором в дальнейшем обозначены синие точки с известным состоянием поверхности. Материалы мультиспектральной космической съёмки обеспечили возможность измерения усреднённых значений коэффициентов спектральной яркости (ось ординат) пикселей в тринадцати спектральных каналах (ось абсцисс) видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра.

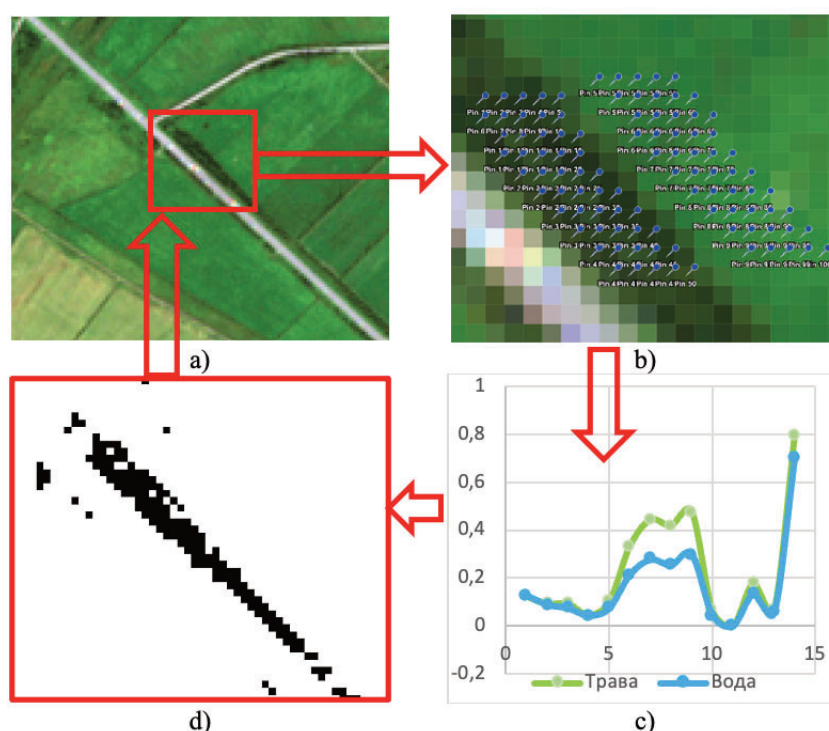


Рис. 2. Результаты выполнения операций технологии: а) выбор участка местности; б) формирование исходных данных для обучающей и контрольной выборок; в) анализ данных для разработки спектрально-яркостных признаков идентификации; д) идентификация мест подтопления

На рисунке 2б) представлены две группы точек для формирования исходных данных для элементов ландшафта с условным наименованием «Вода» (в левой части) и «Трава» (правее). На рисунке 2д) чёрным цветом обозначены результаты идентификации мест подтопления в пределах фрагмента сцены.

На рисунке 3 приведена гистограмма для расчета показателей качества результатов идентификации мест подтопления [1].

На рисунке 3 по оси абсцисс отложены условные значения показателя, рассчитанного на основе спектральных отражательных характеристик элементов ландшафта и учитываемого в алгоритме машинного обучения [1,2]. Красной линией обозначено принятое при идентификации значение гиперпараметра. По оси ординат отложено количество элементов ландшафта (пикселей), отражающих соответствующее значение гиперпараметра в пределах контрольной выборки.

На рисунке 4 приведен пример идентификации мест усыхания лесной растительности. Содержание составных частей и принятые обозначения на рисунке 4 аналогичны рисунку 2.

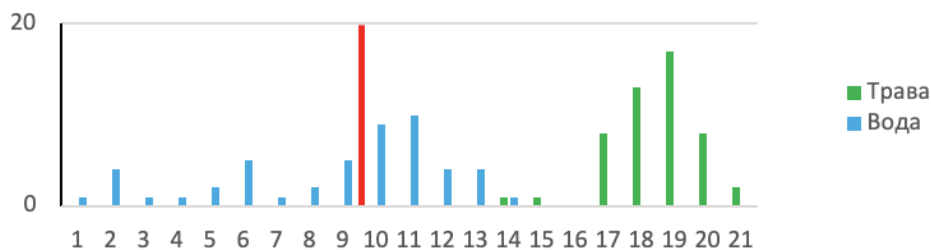


Рис. 3. Гистограмма для расчета показателей качества идентификации

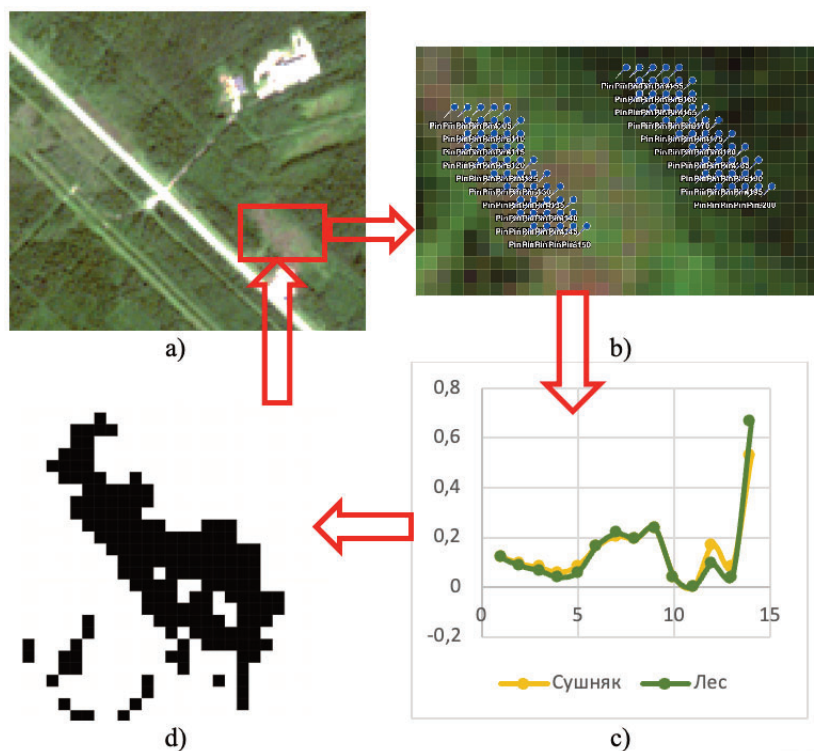


Рис. 4. Результаты идентификации мест высыхания лесной растительности

Предварительный анализ усреднённых спектральных характеристик, приведенных на рисунках 2с) и 4с), позволяет выдвинуть предположение, что качество автоматизированной идентификации воды на фоне травы должно быть выше результатов идентификации усыхающей лесной растительности на.

Для расчета показателей качества результатов идентификации сухостоя на фоне леса осуществляется построение гистограммы по аналогии с данными, приведёнными на рисунке 3.

В таблице 1 представлены результаты оценивания показателей качества автоматизированной идентификации состояния элементов ландшафта [1].

| Показатели качества автоматизированной идентификации | | |
|--|---|----------------|
| Условное обозначение показателя качества идентификации | Значение показателя для пар идентифицируемых поверхностей | |
| | «Вода-трава» | «Сухостой-лес» |
| REC | 1 | 0,96 |
| PRE | 0,96 | 0,98 |
| OA | 0,98 | 0,97 |

Таблица 1

Показатель REC отражает правильную идентификацию соответствующего неблагоприятного явления (поверхности) на фоне естественного ландшафта. Показатель PRE характеризует ситуацию, когда наряду с выявленным нарушением, присутствуют ошибочно идентифицированные естественные элементы ландшафта. Обобщенная оценка качества ОА отражает возможность идентификации элементов ландшафта, находящихся как в естественных, так и в неблагоприятных условиях.

Числовые значения показателей качества результатов автоматизированной идентификации фактов неблагоприятного воздействия на окружающую среду для приведенных примеров сопоставимы. Более уверенно идентифицируются подтопления на фоне травяного покрова.

Выводы

Приведенные примеры выявления фактов неблагоприятного воздействия на окружающую среду вблизи больших массивов грунтовых масс обуславливают необходимость проведения научных исследований, направленных на анализ возможных последствий ошибок при проектировании, строительстве и эксплуатации крупных инфраструктурных объектов.

На основе автоматизированной обработки архивных и оперативных материалов космической съёмки существует возможность объективного оценивания состояния элементов ландшафта, взаимодействующих с массивами грунтов.

Литература

1. Зеленцов В.А., Мочалов В.Ф. Показатели и алгоритмы оценивания качества результатов идентификации состояния прилегающих территорий//Интеллектуальные транспортные системы, 2024 №3. СПб. С. 73-82.
2. Мочалов В.Ф., Хабаров Р.С. Обработка материалов мультиспектральной съёмки на основе методов машинного обучения при управлении состоянием лесного массива // Сборник материалов IV Международной научной конференции по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2021) (Санкт-Петербург, 21–23 сентября 2021). СПб.: ЛЭТИ, 2021. С. 269–272.
3. Рашка С. Python и машинное обучение / пер. с англ. А. В. Логунова. М.: ДМК Пресс, 2017. 418 с.
4. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений / пер. с англ. А. В. Кирюшина, А. И. Демьяникова, 3-е изд. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА УНИКАЛЬНЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА

В.А. Наход¹, А.И. Малов¹, К.Б. Данилов¹, Г.Д. Горелик²

¹ ФГБУН Федеральный исследовательский Центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова
УрО РАН, 163020, г. Архангельск, пр. Никольский, 20

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106,
г. Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, 2—4/45

E-mail: Nakhod.Vitaliy@knauf.ru, malovai@yandex.ru, danilov_kostea@mail.ru, gleb.gorelik@yandex.ru

Территория Архангельской области богата уникальными природными объектами, одним из них является Чугский государственный природный ландшафтный заказник регионального значения. Охраняемая природная территория была создана с целью сохранения уникальных форм рельефа, представленных пещерами, карстовыми логами, шелошняковыми полями и другими формами карстовых образований. На территории Чугского заказника выявлено более 100 пещер, что составляет около четверти всех известных пещер в Архангельской области. По плотности пещер Чугский рельеф занимает первое место на Севере России. Общая протяженность их свыше 15 км, 10 из них превышают длину в 500 м. Крупнейшие пещеры: система пещер «Пограничная-Звездочка» (1910 м), «Лунные Горы» (1233 м), «Апрельский узел» (1069 м). Изученность пещер Чугского заказника в настоящее время недостаточна. Прежде всего, это касается гидрологии и экзодинамики подземной среды. Имеются большие перспективы спелеоподводных исследований. Серьезного изучения требуют многолетние наледи (ледники) в пещерах [9].

Основным техногенным фактором, оказывающим влияние на рельеф территории, является открытая добыча гипсового камня с формированием карьера. Глубина карьера достигает 20 метров. В структуре карьера можно выделить один добычной и один вскрышной уступы. Ввиду того, что сам карьер расположен вне заказника, основное влияние на рельеф заказника оказывают буровзрывные работы. Годовой объем взорванной горной массы находится в пределах 300 – 350 тыс. кубических метров горной породы, периодичность проведения взрывных работ – ежемесячная.

Целью работы являлось определение степени воздействия деятельности горнодобывающего предприятия на наиболее близко расположенную к карьере пещеру Апрельский узел, внесенную в кадастр гипсовых пещер Мира. При этом рассматривались два возможных сценария. Первый – ежедневная эксплуатация горно-добычного оборудования, а именно дробление негабаритных кусков горной массы с помощью гидромолота, погрузка взорванной горной массы в дробильно-сортировочный комплекс, дробление и классификация, транспортировка вскрышных и добычных пород, буровые работы. Сопоставление полученных данных в разные дневные интервалы, а именно с 7 до 19 часов – рабочая смена и с 19 до 7 часов нерабочее время на карьере. Второй – проведение взрывных работ с помощью систем неэлектрического инициирования с короткозамедленным взрыванием и экспериментальные исследования затухания взрывных волн на участке между карьером и входом в пещеру Апрельский узел. Согласно литературным данным, в сооружениях и зданиях повреждения не выявляются при скоростях колебания до 3-5 см/с [1, 3, 5, 6, 10-13].

Для проведения эксперимента было установлено пять сейсмометров, три Güralp 6TD, два Trillium Compact с цифровыми регистраторами Pegasus. Схема расположения датчиков и взрывных блоков представлена на рис. 1.

Принцип действия велосиметра основан на преобразовании внешних низкочастотных колебаний, возникающих в месте установки прибора, в электрический сигнал, амплитуда и частота которого пропорциональны внешнему воздействию. Велосиметр состоит из трёх однокомпонентных датчиков, встроенного цифрового преобразователя и калибратора, расположенных в общем герметичном корпусе. Датчики установлены так, что их чувствительные оси ориентированы ортогонально друг к другу. При установке велосиметра оси датчика ориентируются в направлениях: север-юг, восток-запад, третья ось - вертикальная компонента движения.

Имеющееся оборудование позволяло проводить исследование ускорения колебаний пород, а также скорости колебаний в интервале частот от 2 до 100 Гц. Определение скоростей сейсмических

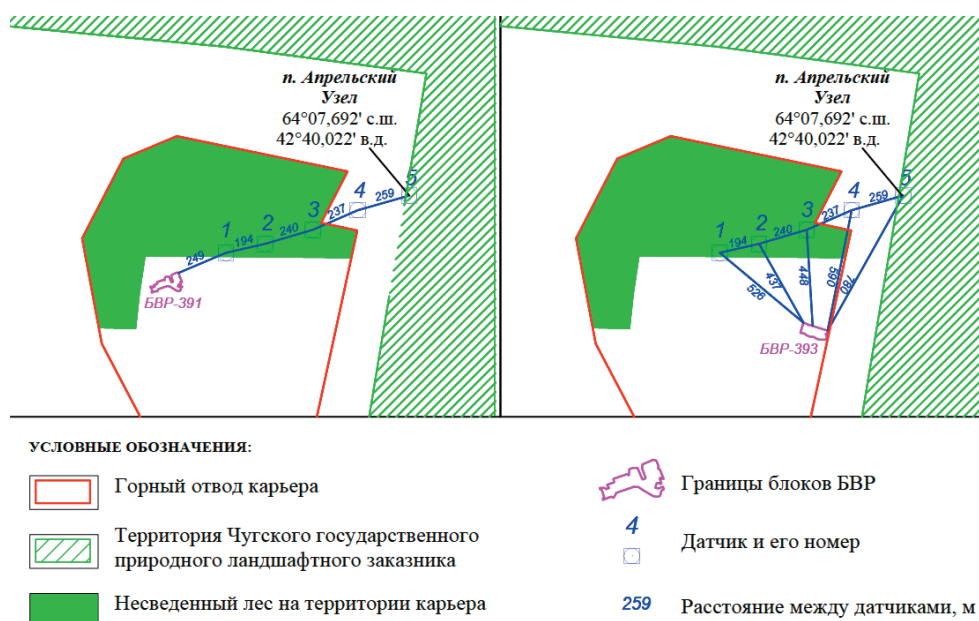


Рис. 1. Схема расположения сейсмометров относительно взрывных блоков

колебаний по трем осям в пяти точках осуществлялось одновременно, расстояния от места установок датчиков до взрывааемых блоков (эпицентров событий) представлены на рис. 1.

Согласно спецификации, номинальная выходная чувствительность используемых регистраторов составляет $2 \cdot 10^{-9}$ метров в секунду на отчет. Шаг дискретизации пор времени составляет 10 мс. Для определения ускорения была написана специальная программа, где для всего массива данных рассчитывается первая производная по времени.

Для анализа первого сценария воздействия были проанализированы данные ежедневного сейсмического воздействия деятельности карьера на массив горных пород. Общая продолжительность замеров составила полтора месяца. Пример полученных данных за 01.07.2024 года представлен в таблице 1.

Таблица 1

| Суточные данные сейсмического воздействия | | | | | | | |
|---|------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Датчик | Компонента | 0 – 7 ч | | 7 – 19 ч | | 19 – 24 ч | |
| | | (простой карьера) | | (работа карьера) | | (простой карьера) | |
| | | Средняя скорость, мм/с | Среднее ускорение, мм/с ² | Средняя скорость, мм/с | Среднее ускорение, мм/с ² | Средняя скорость, мм/с | Среднее ускорение, мм/с ² |
| PSS1 | EW | 0,000223 | 0,000000 | 0,000219 | 0,000000 | 0,000192 | 0,000000 |
| | NS | -0,011191 | 0,000001 | -0,011626 | 0,000000 | -0,011579 | 0,000000 |
| | Z | -0,025070 | 0,000001 | -0,023433 | 0,000000 | -0,023541 | 0,000000 |
| PSS2 | EW | 0,000181 | 0,000000 | -0,000099 | 0,000000 | 0,000333 | 0,000000 |
| | NS | -0,003207 | 0,000000 | -0,002651 | 0,000000 | -0,002153 | 0,000000 |
| | Z | -0,018592 | 0,000000 | -0,017043 | 0,000000 | -0,017640 | 0,000000 |
| PSS3 | EW | -0,069549 | 0,000000 | -0,069728 | 0,000000 | -0,068941 | 0,000000 |
| | NS | -0,022573 | 0,000000 | -0,022129 | 0,000000 | -0,022261 | 0,000000 |
| | Z | 0,011609 | 0,000001 | 0,013610 | 0,000000 | 0,006531 | 0,000000 |

Для определения максимального воздействия были выделены пиковые значения по каждой компоненте в течение суточной активности. Полученные данные за 06.06.2024 представлены в таблице 2.

Таблица 2

| Пиковые значения сейсмического воздействия | | | | | |
|--|------------|-----------------------------|----------|---|----------|
| Датчик | Компонента | Максимальная скорость, мм/с | Время | Максимальное ускорение, мм/с ² | Время |
| PSS1 | EW | -0,15093 | 19:32:47 | -12,7866 | 19:32:47 |
| | NS | -0,12338 | 17:32:59 | -9,7148 | 19:32:47 |
| | Z | -0,10621 | 17:32:59 | -8,9542 | 17:32:59 |
| PSS2 | EW | 0,06540 | 19:32:47 | -10,3916 | 17:32:59 |
| | NS | 0,03766 | 2:49:30 | -5,8166 | 17:33:14 |
| | Z | -0,06707 | 17:33:14 | -8,2402 | 17:33:14 |
| PSS3 | EW | -0,10105 | 2:42:51 | 5,9786 | 2:42:44 |
| | NS | -0,06922 | 2:42:50 | -10,5366 | 2:42:50 |
| | Z | 0,04451 | 2:42:50 | -6,2128 | 2:42:50 |

Анализ полученных данных и сравнение их с нормативными документами, свидетельствует о том, что скорости смещения горных пород, выявленные при оценке ежедневной деятельности горнодобывающего предприятия, находятся в пределах значений, не оказывающих критического воздействия на сооружения, имеющие высокую социальную значимость [2]. Максимальные пиковые значения, выявленные датчиком PSS1 на расстоянии 249 метров от места проведения горных работ, в 20 раз меньше установленных государственным стандартом, если же провести сравнение данных с методическими рекомендациями по оценке устойчивости бортов осушаемых карьеров [8], фактические скорости смещения горных пород в массиве в 800 раз меньше допустимых значений. По итогам эксперимента можно утверждать, что деятельность карьера по добыче гипсового камня не приводит к возникновению деформаций в толще горных пород.

В период проведения эксперимента было зафиксировано два события, а именно проведение взрывных работ 13 июня и 13 июля 2024 года, которые послужили источником данных для второго сценария воздействия от буровзрывных работ. Объем горной массы подверженной рыхлению составил 47244 м³ и 53074 м³ соответственно, объем взрывчатых материалов составлял 47900 кг и 46000 кг.

Параметры полученных пиковых значений представлены в таблице 3.

Таблица 3

| Пиковые значения сейсмических колебаний от взрывов | | | | | | | | | |
|--|--------|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--|-------------------------------|---|
| Расстояние от места взрыва до датчика, м | Датчик | Пиковые скорости (Z компонента), м/с | Пиковые ускорения (Z компонента), м/с ² | Пиковые скорости (E компонента), м/с | Пиковые ускорения (E компонента), м/с ² | Пиковые скорости (N компонента), м/с | Пиковые ускорения (N компонента), м/с ² | Пиковые скорости (общая), м/с | Пиковые ускорения (общая), м/с ² |
| 13.06.2024 | | | | | | | | | |
| 249 | PSS1 | -0,0209 | -2,5087 | -0,0186 | 2,7322 | 0,0199 | 3,3019 | 0,0344 | 4,9660 |
| 443 | PSS2 | 0,0187 | -3,1995 | 0,0204 | 2,8247 | 0,0173 | 1,9158 | 0,0326 | 4,6782 |
| 683 | PSS3 | 0,0097 | -1,5501 | 0,0117 | 2,0015 | -0,0147 | 2,2890 | 0,0211 | 3,4130 |
| 920 | TRI3 | -0,0006 | 0,0942 | -0,0014 | 0,1997 | -0,0012 | -0,1478 | 0,0020 | 0,2657 |
| 1179 | TRI6 | 0,0013 | 0,2333 | -0,0049 | 0,4963 | 0,0023 | 0,2716 | 0,0055 | 0,6120 |
| 13.07.2024 | | | | | | | | | |
| 526 | PSS1 | 0,0172 | 2,2745 | -0,0166 | 1,6309 | -0,0164 | -1,7461 | 0,0290 | 3,2988 |
| 438 | PSS2 | -0,0189 | -2,9996 | -0,0192 | -2,8226 | 0,0174 | -2,9242 | 0,0321 | 5,0513 |
| 448 | PSS3 | -0,0157 | 2,2871 | 0,0155 | 2,8053 | -0,0165 | -1,9845 | 0,0275 | 4,1278 |
| 590 | TRI3 | 0,0012 | -0,1648 | 0,0009 | 0,1359 | -0,0017 | -0,2389 | 0,0023 | 0,3205 |
| 780 | TRI6 | -0,0015 | 0,1910 | -0,0065 | 0,6862 | 0,0023 | 0,2578 | 0,0071 | 0,7575 |

Максимальное значение скорости распространения волн от взрывных работ 13.06.2024 отмечается на расстоянии 249 метров от эпицентра взрыва датчиком PSS1 и составляет 0,02094 м/с, ускорение при этом 2,5087 м/с², минимальные пиковые значения выявлены датчиком TRI3 в точке №4 на расстоянии 920 метров и составили 0,0006 м/с и 0,0942 м/с². Максимальное пиковое значение скорости для взрывных работ от 13.07.2024 отмечается датчиком PSS2 в точке №2 на расстоянии 438 метров и составляет 0,0189 м/с, ускорение при этом - 2,9996 м/с², минимальные пиковые значения также выявлены в точке №4 датчиком TRI3 на расстоянии 590 метров от взрыва и соответствуют 0,0012 м/с и 0,1648 м/с². Диаграммы скорости распространения сейсмических колебаний в зависимости от расстояния до места взрыва представлены на рис. 2.

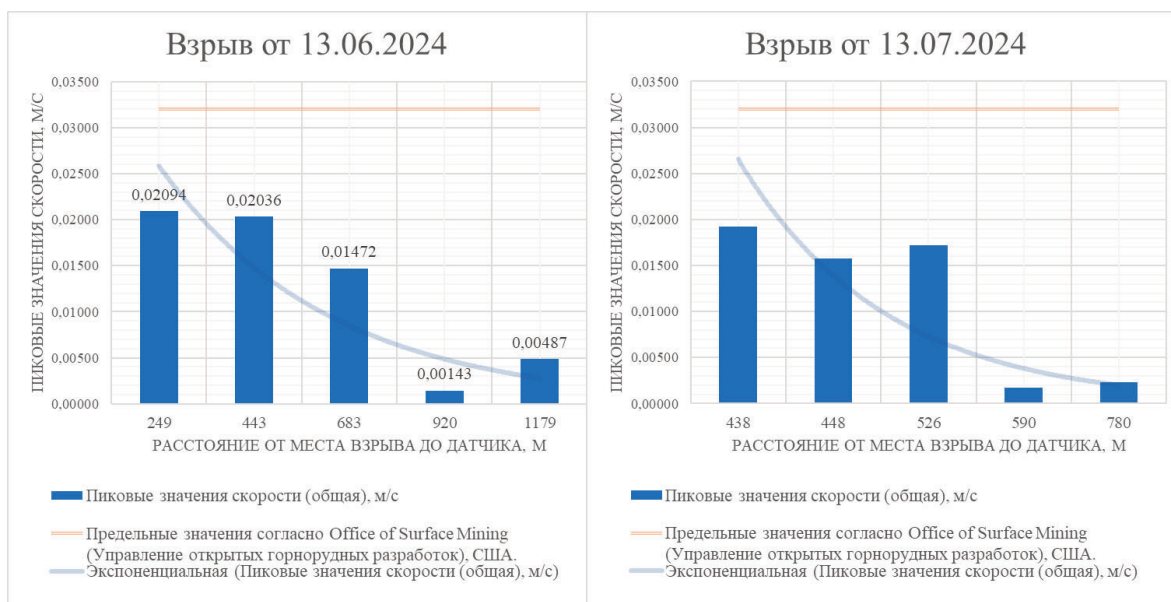


Рис. 2. Диаграммы скорости распространения сейсмических колебаний

Полученные данные от проведения взрывных работ показывают нелинейную зависимость скорости колебаний от расстояния до места проведения взрыва. На обеих диаграммах отмечается увеличение значений скорости, измеренной датчиком №5, который был установлен непосредственно у входа в пещеру Апрельский узел. Данные значения могут быть обусловлены заполнением пещеры водой, что в свою очередь усиливает влияние сейсмических волн и снижает устойчивость горных пород [4, 7].

На сегодня отсутствуют нормативные документы, регламентирующие допустимые скорости смещения пород для естественных уникальных форм рельефа, таких как пещеры. Для сравнения полученных данных мы можем обратиться к ГОСТ Р 52892-2007 [2] и к методическому изданию «Устойчивость бортов и осушение карьеров: лабораторный практикум» [8]. В ГОСТ представлено три варианта определения критических значений: согласно национальному стандарту Германии DIN 4150-3:1999, согласно национальному стандарту Великобритании BS 7835-2:1993 и согласно Office of Surface Mining (Управление открытых горнорудных разработок), США. В них предельные значения установлены для невысоких зданий (одно- или двухэтажных), подвергающихся воздействию сейсмических волн, которые образуются в результате взрывов при разработке открытых месторождений. Сравнение полученных нами данных с рекомендациями Office of Surface Mining показало, что полученные пиковые значения скоростей (от 0,00143 до 0,02094 м/с) составляют 4-65 % от предельно установленного значения 0,032 м/с. Если же сравнивать с рекомендациями по оценке устойчивости бортов карьера [8], то воздействие от проведения взрывных работ составит не более 17 % от допустимых значений.

Литература

1. Башков В.И., Еременко А.А., Машуков И.В. Оценка сейсмического воздействия массового взрыва на здания в районе Таштагольского месторождения. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 2. С. 160—171.

2. ГОСТ Р 52892-2007. Группа Ж02. Национальный стандарт Российской Федерации. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. М., 2007.
3. Жариков С.Н., Берсенов Г.П., Кутуев В.А., Флягин А.С. Научные исследования сейсмического действия взрыва на подземный газопровод высокого давления. Проблемы недропользования. 2019. № 3 (22). С. 145—154.
4. Железняк И. И., Манилюк В. В. Исследование устойчивости карстовой пещеры Хээтэй к динамическим воздействиям при взрывном способе разработки Усть-Борзинского месторождения известняков в Восточном Забайкалье. Литосфера. 2017. том 17. № 4. С. 137–143
5. Куликов В.И., Ганопольский М.И. Воздействие массовых взрывов при подземной разработке железорудных месторождений на застройку и население города Губкин. Взрывное дело. 2018. № 121—78. с. 135—153.
6. Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А., Ташкинов А.С. Определение сейсмобезопасных расстояний при массовых промышленных взрывах с учетом преобладающей частоты колебаний. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 6 (118). С. 56—62.
7. Саваренский Е.В., Кирнос Д.П., Элементы сейсмологии и сейсмометрии. Москва: ГИТТЛ, 1955, 543 с.
8. Стафеев А.А., Лобанова Т.В. Устойчивость бортов и осушение карьеров: лабораторный практикум. Новокузнецк, СибГИУ, 2008.
9. Шаврина Е.В. Судьба Чугского заказника. http://www.nordspeleo.ru/hyga/st_hyga/sydba.htm
10. Hudaverdi T., Akyildiz O. Investigation of the site-specific character of blast vibration prediction. Environmental Earth Sciences. 2017. T. 76. № 3. С. 138.
11. Nguyen H., Bui X.N., Drebenstedt C., Bui D.T. Prediction of blast-induced ground vibration in an open-pit mine by a novel hybrid model based on clustering and artificial neural network. Natural Resources Research. 2019.
12. Singh P.K., Roy M.P., Paswan R.K., Dubey R.K., Drebenstedt C. Blast vibration effects in an underground mine caused by open-pit mining. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. T. 80. С. 79—88.
13. Xu J., Kang Y., Wang X., Feng G., Wang Z. Dynamic characteristics and safety criterion of deep rock mine opening under blast loading. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. T. 119. С. 156—167.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ ОТВАЛОВ ЛЕВИХИНСКОГО РУДНИКА (СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

П.А. Рыбников, Л.С. Рыбникова, А.Н. Галин

Институт горного дела УрО РАН, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58
E-mail: ribnikoff@yandex.ru, luserib@mail.ru

Лёвихинская группа медноколчеданных месторождений находится в Кировградском районе Свердловской области (средний Урал). Месторождения открыты в 20-30-х годах прошлого века. В 1927 г. начата эксплуатация открытым способом и организован отвал для размещения вскрышных пород и некондиционных руд. С 2003 г. началась ликвидация рудника посредством затопления горных выработок. Специальные мероприятия по ликвидации рудника и реабилитации его территории не проводились.

Лёвихинское рудное поле сложено вулканитами и метасоматитами. Рудные тела имеют линзовидную форму, приурочены к грубообломочным фациям и характеризуются сложной формой. Основные минералы: пирит, халькопирит, сфалерит, борнит, блеклые руды, пирротин, магнетит, галенит, халькозин, ковеллин, самородное золото.

На территории Лёвихинского рудника расположено 11 отвалов общей площадью 304,6 тыс. м² и объемом 1728,8 тыс. м³, в том числе самый большой из них — отвал «Южный», который сформирован в районе шахты «Лёвиха XII» и имеет площадь 226 тыс. м² и объем 1455 тыс. м³ (рис. 1).

Отвалы сложены пустыми вмещающими породами, содержащими вкрапленные сульфиды (преимущественно пирит, халькопирит, сфалерит, марказит), и вскрышными породами, представленными амфиболитами и серицитовыми сланцами. В состав отвала «Южный» на момент окончания его эксплуатации входили рудовмещающие (диабазы (5%), альбитофиры (10%), порфириды (10%), кварц-серицитовые и кварц-хлоритовые сланцы (75%) и породообразующие (плагиоклаз, альбит, хлорит, серицит и кварц) минералы [2, 3, 5].

Для детального анализа и определения состава пород отвала в настоящее время были отобраны 12 проб. Опробование выполнялось в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84.

Цель исследования — изучить состав грунтов отвалов, оценить их влияние на состояние гидросферы, определить наиболее значимые экологические аспекты длительного размещения техногенных грунтов и оценить ущерб окружающей среде в районе отработанного Лёвихинского рудника.

Среднее содержание минералов в материале проб составляет: кварц — 36 %, глинистые минералы — 32 %, полевые шпаты — 9 %, пирит — 7 %, кальцит и бассанит — по 5 %, остальные 6 % представлены гипсом, сильвином и карналлитом (рис. 2).

В химическом составе проб пород отвала по отношению к ПДКп¹ имеются превышения по элементам I класса опасности (в скобках кратность превышения) Zn (37), As (33), Cd (10), Pb(2); II класса опасности Cu (60), Ni (2), Sb (2); III класса опасности V(3).

Из-за механических процессов при добыче породы дробятся и разрушаются, что приводит к увеличению фильтрационных свойств, увеличению поверхности взаимодействия пород и агентов выветривания. По всей поверхности отвала происходит практически полное поглощение атмосферных осадков, обогащенных кислородом, что приводит к циклическим процессам окисления, растворения, осаждения минералов в теле отвала. В итоге формируется специфический гидрохимический состав подотвальных вод, которые разгружаются по периметру отвала [1].

Подотвальные воды Лёвихинского рудника характеризуются высокой кислотностью (рН от 1,92 до 2,6) и минерализацией (от 13 до 52 г/л). Состав вод сульфатный магниево-алюминиево-железный. Подотвальные воды имеют высокую концентрацию сульфат-иона (от 10 до 39 г/л), железа (от 1,5 до 8,7 г/л), алюминия от (0,6 до 2,9 г/л), магния (от 0,4 до 1,7 г/л), меди (от 0,09 до 0,3 г/л), цинка

¹ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: введен в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2 (с изменениями на 30 декабря 2022 года).

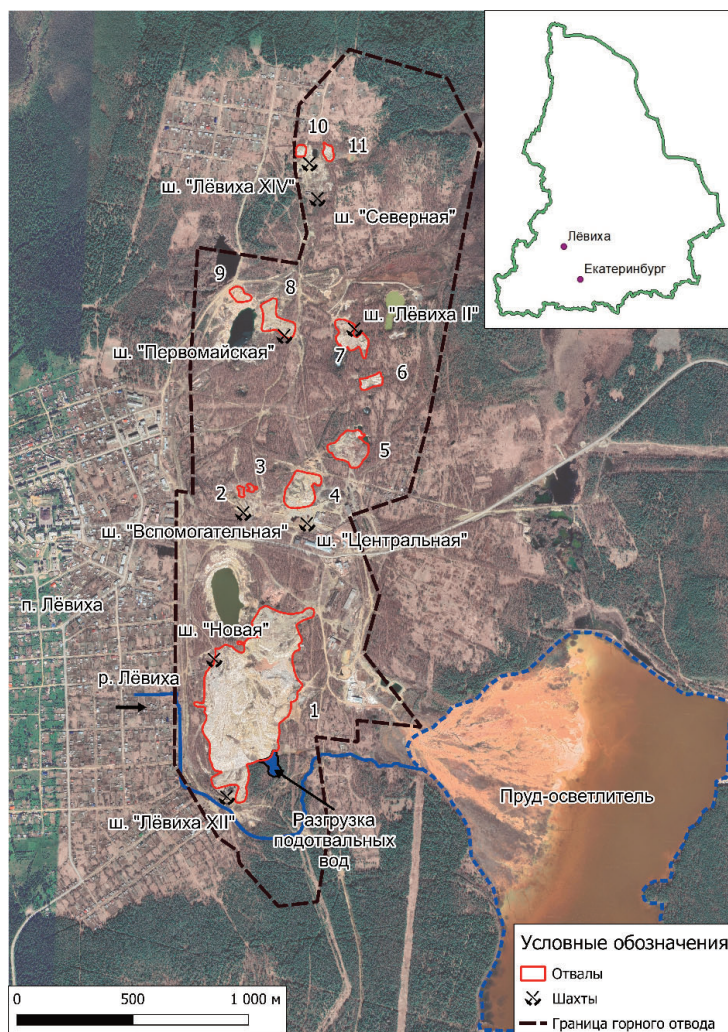


Рис. 1. Схема расположения отвалов

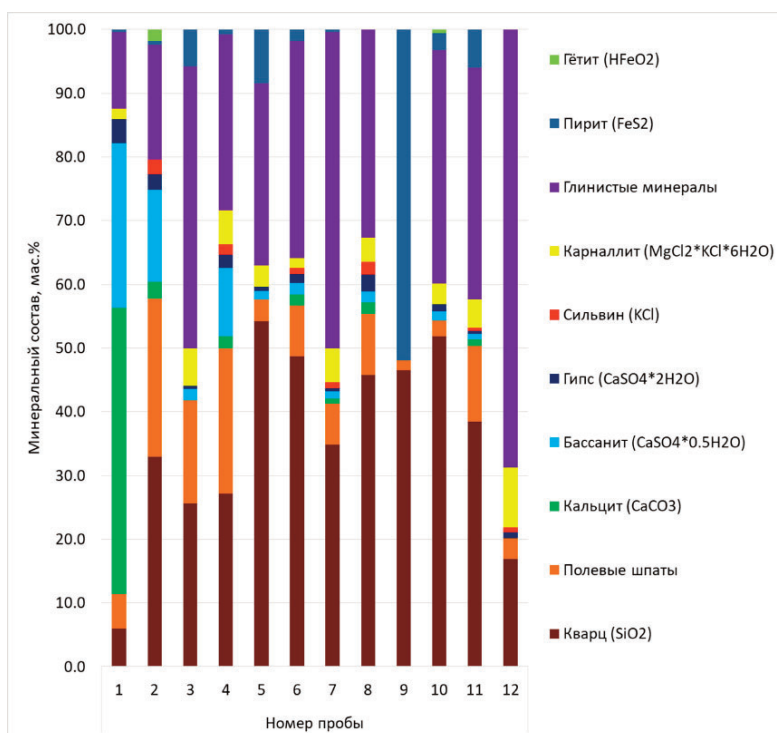


Рис. 2. Минеральный состав проб отвала, мас. %

(от 0,1 до 0,3 г/л) (табл. 1). По отношению к ПДК_{рх}² превышены содержания меди (до 332200), цинка (до 30370), марганца (до 13460) и кобальта (до 260).

| Таблица 1 | |
|-------------------------|---|
| Состав подотвальных вод | |
| Дата опробования | Формула Курлова |
| 04.08.2020 | M23,5 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 46 Al 31 Mg 17}$ pH 2,31 T 18,10C Eh 566 mV |
| 13.10.2020 | M52,1 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 56 Al 22 Mg 17}$ pH 2,16 T 8,50C Eh 554 mV |
| 14.04.2021 | M13,0 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 36 Al 34 Mg 19}$ pH 2,60 T 11,40C Eh 244 mV |
| 04.08.2021 | M44,0 ¹ $\frac{SO_4 100}{Al 42 Fe^{3+} 41 Mg 14}$ pH 1,92 T 250C Eh 300 mV |
| 24.09.2021 | M38,5 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 42 Al 31 Mg 22}$ pH 2,26 T 14,40C Eh 281 mV |
| 28.07.2022 | M43,5 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 50 Al 29 Mg 16}$ pH 2,09 T 22,80C Eh 290 mV |

Для оценки процессов формирования подотвальных вод были определены формы миграции компонентов и рассчитаны индексы насыщения подотвальных вод по отношению к минералам. Для этого использовалось программное обеспечение равновесного физико-химического моделирование геохимических процессов в системе «вода-порода» Visual MINTEQ 3.1 [6]. Индекс насыщения (saturation index — SI) представляет собой десятичный логарифм отношения произведения активностей ионов (ion activity product – IAP) к константе растворимости (K_{sp}) соединения или минерала при заданной температуре:

$$SI = \log(IAP/K_{sp}).$$

Индекс насыщения характеризует недосыщенность или пересыщенность раствора по отношению к твердой фазе, другими словами, указывает на потенциальную возможность растворения (при SI < 0) или осаждения (при SI > 0) минерала. Нулевое значение индекса насыщения говорит о том, что раствор находится в равновесии с минералом.

Двухзарядные катионы (Fe, Ca, Mg, Mn и Cu) мигрируют как в свободной форме, так и в виде комплексных соединений сульфата (рис. 3). Исключениями являются Zn и Al, которые образуют до 70 и 95%, соответственно, комплексных соединений сульфата и только 30 и 5% мигрируют в свободной форме (рис. 3). Трехзарядный катион железа также мигрирует преимущественно в виде сульфатных комплексов (рис. 3).

Все пробы характеризуются пересыщением по отношению к минералам группы сульфатов, индексы насыщения от 0,2 до 5,2 (рис. 4).

Практически все пробы показывают пересыщение по отношению к минералам группы оксидов, индексы насыщения изменяются от -0,9 до 7,9. Особенно высокую степень пересыщения можно отметить для гематита (от 5,8 до 7,9) (рис. 4).

Индексы насыщения минералов группы оксид-гидроксидов варьируются от 0,8 до 2,8 (рис. 4).

² Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: утверждены приказом Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года №552 с изм. на 12 октября 2018 года. – Москва: Изд-во ВНИРО, 2011. – 257 с.

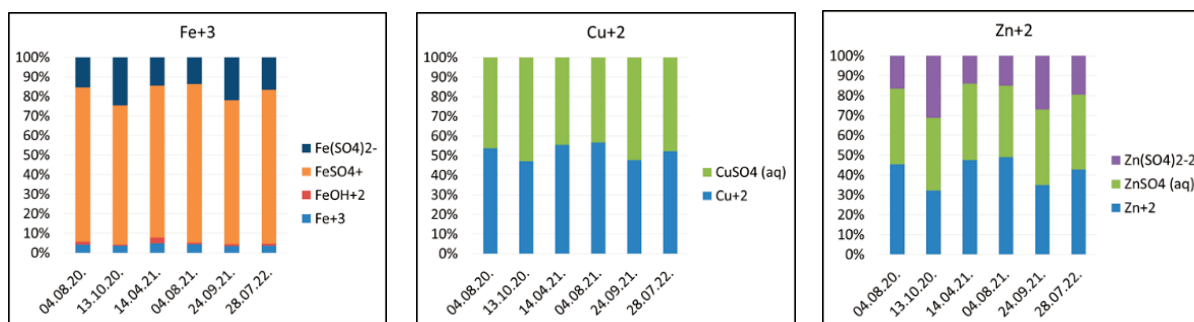


Рис. 3. Формы миграции ионов меди, цинка и трехвалентного железа

Ввиду актуальности идеи извлечения из отвала ценных компонентов (золота, серебра и др.) был проведен анализ содержания этих элементов в отвале. Потенциальная извлекаемая ценность металлов в отвале составляет (млн руб.): Fe (2,5), S (2,5), Au (0,7), Cu (0,6), Zn (0,15) и Ag (0,14).

Формирующиеся в течение нескольких десятилетий кислые подотвальные воды оказывают заметное негативное воздействие на окружающую среду. Ежегодно с отвала выносятся 900 т элементов, в том числе железо, алюминий, медь, цинк и марганец. Физико-химическое моделирование показало, что вынос элементов будет продолжаться ещё сотни лет. Размер эколого-экономического ущерба, который причиняется р. Лёвиха в результате поступления неочищенных подотвальных вод, составляет более 95 млн руб. в год [4].

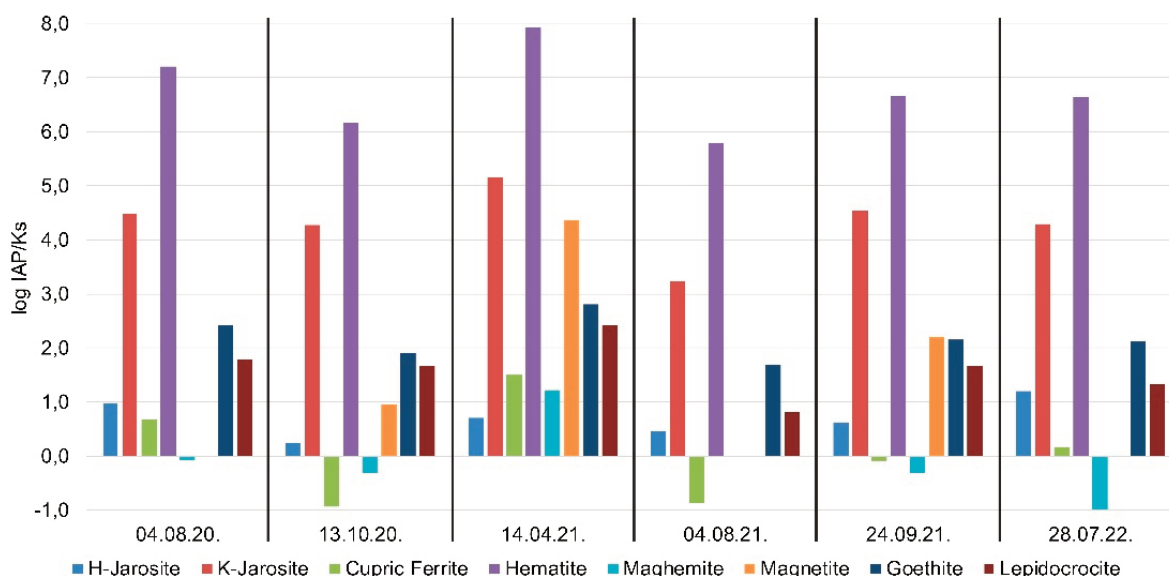


Рис. 4. Индексы насыщения подотвальной воды по отношению к минералам

Выводы

В минеральном составе проб пород отвала преобладают кварц, полевые шпаты и глинистые минералы, присутствуют сульфаты и сульфиды. В химическом составе отвала по отношению к ПДКп в большинстве проб обнаружены повышенные количества элементов I-III класса опасности.

Подотвальные воды показывают сильно кислую реакцию среды (до pH=1.92) и высокую минерализацию (от 13 до 52 г/л) с повышенными содержаниями меди, цинка, марганца и кобальта.

Большая часть катионов образуют комплексные соединения с сульфат-ионом. Подотвальные воды пресыщены по отношению к минералам групп сульфатов, оксидов и оксид-гидроксидов.

Отвалы Лёвихинского рудного поля существуют уже почти сто лет. Потенциальная извлекаемая ценность полезных элементов в отвале не превышает 5 млн руб. Ежегодно с отвала в окружающую среду выносятся более тонны таких веществ, как сера, железо, алюминий, медь, цинк и марганец, экологический ущерб гидросфере р. Лёвиха составляет почти 100 млн руб. в год. Для предотвращения дальнейшего загрязнения окружающей среды и гидросферы, необходимо провести рекультивацию отвала.

Источник финансирования: тема 2 (2025-2027 гг.). Геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении ресурсов недр (FUWE-2025-0002). Г.р. № 1022040300092-1-1.5.1

Литература

1. Алексеев В.А. Причины образования кислых дренажных вод в отвалах сульфидсодержащих пород // *Геохимия*, 2022. Т. 67. № 1. С. 69–83.
2. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Лёвихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // *Геохимия*, 2019. Т. 64. № 3. С. 282-299.
3. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю., Галин А.Н. Гидрогеоэкологические аспекты изучения техногенных отходов отработанного Лёвихинского медноколчеданного рудника (Свердловская область) // В сборнике: *Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии*. Москва, 2022. С. 428-433.
4. Рыбникова, Л.С., Рыбников П.А., Галин А.Н. Исследование формирования состава подотвальных вод медноколчеданного месторождения среднего Урала // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 2023. № 2. С. 165-176. DOI: 10.15372/FTPRPI20230216.
5. Мормилъ С.И., Сальников В.Л., Амосов Л.А., Бурмистренко А.В., Семячков А.И., Хасанова Г.Г., Зобнин Б.Б. Техногенные месторождения Урала и оценка их воздействия на окружающую среду. Екатеринбург, НИИ-Природа, ДПП по Уральскому региону, ВНИИЗАРУБЕЖГЕОЛОГИЯ, 2002. 206 с.
6. *Visual MINTEQ*. [Электронный ресурс] URL: <https://vminteq.com/> (дата обращения: 10.12.2024).

ГИДРОГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ КАВКАЗА И ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РОССИИ

В.Б. Свалова

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2
Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а
E-mail: v-svalova@mail.ru

Быстрый рост энергопотребления, ограниченность и удорожание ресурсов невозобновляемого топлива, обострение экологических проблем заставляют мировую экономику широко использовать альтернативные источники энергии. Геотермальные ресурсы являются важнейшим источником развития энергетики, редкометальной и химической промышленности, санаторно-бальнеологического и агропромышленного комплексов.

Россия обладает огромными запасами гидрогеотермальных, т.е. аккумулированных в подземных водах, и петротермальных, аккумулированных в горных породах, ресурсов. В то же время в России они используются далеко недостаточно. Нефтегазовая энергетическая ориентированность России постоянно ставит вопрос о целесообразности и экономической эффективности использования альтернативных источников энергии в стране.

Области повышенного теплового потока на поверхности Земли, связанные с границами литосферных плит и повышенной геодинамической активностью литосферы, являются областями наиболее продуктивного использования геотермальной энергии в России и мире. Наиболее перспективными регионами для практического использования геотермальных ресурсов на территории России являются Северный Кавказ, Западная Сибирь, Прибайкалье, Курило-Камчатский регион, Приморье, Охотско-Чукотский вулканический пояс. Практически повсеместно внутреннее тепло Земли может осваиваться с помощью тепловых насосов.

На примере гидрогеотермальных месторождений Кавказского региона дается геологическое обоснование перспектив выделения высокотемпературных горизонтов термальных вод и горячих массивов. Рассматриваются перспективы локализации петротермальных массивов в виде коровых и мантийных магматических интрузий, формировавшихся как структурно-вещественные комплексы определенных геодинамических обстановок, и мантийные внедрения, транзитом которых служат активные глубинные разломы. Исследуются перспективы развития рекреационно-туристического комплекса Курорты Северного Кавказа.

Места расположения геотермальных станций соответствуют структурам Тихоокеанского огненного кольца, Альпийско-Гималайского пояса и Большого Африканского рифта (Рис. 1).

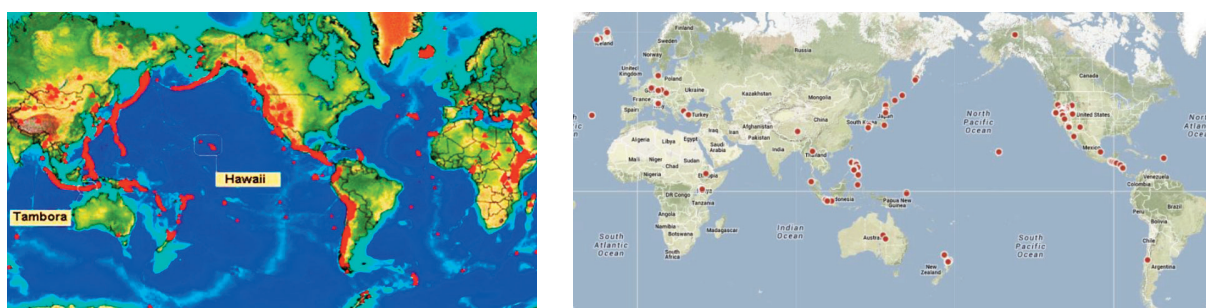


Рис. 1. Горячие области Земли (красный цвет) (USGS) (слева) и геотермальные станции (IGA, ThinkGeoEnergy) (справа). [12, 14]

Как правило, малая гидроэнергетика относится к альтернативной энергетике. Большая гидроэнергетика, начиная с крупных гидроэлектростанций мощностью более 50 мегаватт, иногда в статистических отчетах выделяется в отдельный класс. Также отдельно рассматривается атомная энергетика, которая является альтернативной по отношению к углеводородной, но не является возобновляемой, как солнце, ветер, энергия морских приливов и волн или тепло Земли. Также биомасса

не является в полном смысле возобновляемым энергетическим ресурсом. Таким образом, понятия альтернативной, возобновляемой и зеленой энергетики являются близкими, но не тождественными. Альтернативная энергетика составляет менее 1% в энергобалансе России. В оптимальном режиме доля альтернативных источников могла бы составлять 3-4%.

Геотермальные ресурсы Юга России.

Гидрогеотермальные системы Кавказского региона

Кавказский регион является сложной высоконапряженной геодинамической структурой, характеризующейся повышенным тепловым потоком, высокой сейсмичностью, магматизмом и вулканизмом. Геодинамика Кавказского региона определяется коллизией Евразийской и Аравийской литосферных плит, а также сложной историей развития Альпийско-Гималайского пояса. [4-7, 9, 10].

С точки зрения глубинной геодинамики Кавказ входит в одну из наиболее активных зон коллизии литосферных плит, характеризующихся значительными скоростями горизонтальных и вертикальных движений. Поле скоростей Северного Кавказа характеризуется горизонтальным смещением в северо-восточном направлении со скоростью 26–28 мм/год. Относительно неподвижной Евразии выявлено общее сжатие региона со скоростью 1–2 мм/год, которое является источником современной геологической и сейсмической активности в пограничной области Кавказа и Восточно-Европейской платформы.

Современные вертикальные движения Северо-Кавказского региона характеризуются небольшими вертикальными движениями 2.5 мм/год в равнинной части Осетии, наибольшими для региона скоростями подъема порядка 3.5–4.5 мм/год в горной части Северного Кавказа и умеренным устойчивым подъемом 2.9 мм/год в северной части северного склона Большого Кавказа.

Согласно геодинамическим представлениям, на месте Большого Кавказа 35 млн лет назад существовал глубоководный бассейн шириной около 200 км. При постепенном закрытии его борта сближались до полного столкновения около 11 млн лет назад, после чего регион стал испытывать постоянное воздымание. При сжатии вещество литосферы образовало горный пояс с толщиной коры 45-50 км и толщиной литосферы до 250 км. В дальнейшем 5-10 млн лет назад Большой Кавказ стал быстро подниматься, а на его оси возникли вулканы Эльбрус, Казбек и др.

Сложное напряженно-деформированное состояние литосферы Кавказа выражается в наличии разломов, трещиноватости пород, проявлении магматизма и вулканизма, высокой сейсмичности, повышенного теплового потока, гидротермальной активности, а также подтверждается данными сейсморазведки и сейсмотомографии [3,13] (Рис.2).

Республика Дагестан на Северном Кавказе является одним из крупнейших регионов развития геотермальной энергетики. Общая сумма ресурсов на глубине 0,5-5,5 км позволяют получать около 4 млн м³ / сут геотермального флюида. В настоящее время более 7,5 млн. м³ / год горячей воды с температурой 50-110 °С используется в Дагестане. Среди них 17% - горячая вода; 43% для централизованного теплоснабжения; 20% для теплиц и 3% для бальнеологии и производства минеральной воды. Всего в Дагестане пробурено около 180 скважин на глубину от 200 до 5 500 м. Районы таких городов как Кизляр, Тарумовка и Южносухумск обладают уникальными запасами горячей воды. Например, Тарумовское месторождение обладает запасами геотермальной воды высокой солености (200 г / л) с температурой до 195°С. Пробурено шесть скважин глубиной около 5 500 м, это самые глубокие геотермальные скважины в России. Тесты указывают на высокую проницаемость резервуаров скважин с производительностью от 7500 до 11000 м³ / сут при устьевом давлении 140-150 бар.

На Кавказе и в Предкавказье термальные воды образуют многослойные артезианские бассейны в отложениях мезозойской и кайнозойской эры.

Минерализация и температура этих вод существенно различаются: в передовых прогибах на глубинах 1-2 км - от 0,5 до 65 г / кг и от 0,5 до 65 г / кг при температурах от 70 до 100°С соответственно, а на Скифской платформе на глубинах 4-5 км - от 1 до 200 г / кг при температуре от 50°С до 170°С .

В Дагестане общие разведанные запасы термальных вод составляют 278 тыс. м³ / сут при проточном режиме, а при закачке отработанной воды - 400 тыс. м³ / сут, при этом тепловой потенциал эквивалентен ежегодной замене 600 тыс. т условного топлива. Основные разведанные ресурсы термальных вод с температурой от 40 до 107 ° С с минерализацией 1,5-27 г / л расположены в Северном

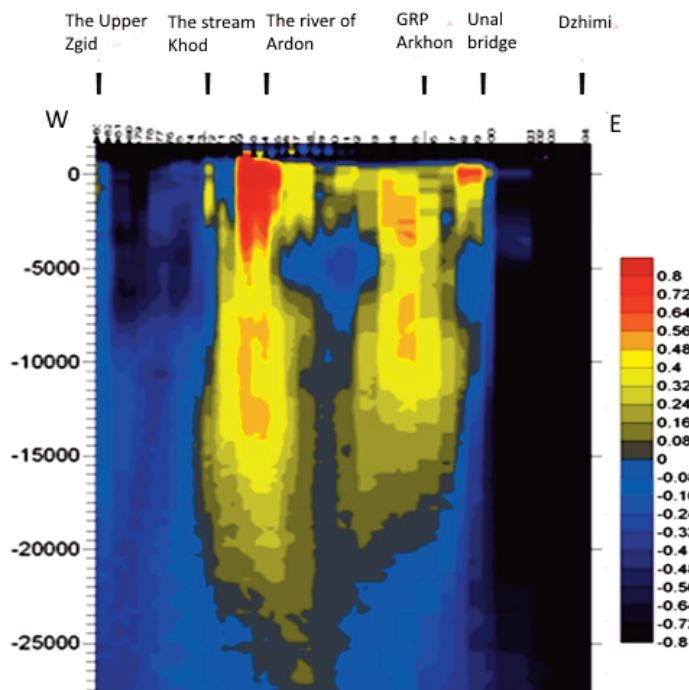


Рис. 2. Профиль микросейсмического зондирования Кавказа до глубины 60 км. Фиксируется разуплотненное тело до глубины Мохо и глубже. Показаны положительные (темные) и отрицательные (светлые) отклонения скорости поперечных волн (км/с) [3]. Слева по вертикали масштаб в метрах



Рис. 3. Геотермальные ресурсы южной части России в Краснодарском и Ставропольском краях, Дагестане и Чечне. [20]

Дагестане. За последние 40 лет в этом районе открыто 12 основных месторождений термальных вод и пробурено и подготовлено к эксплуатации 130 скважин (Рис. 3-5).

Однако в настоящее время используется только 15% потенциала известных запасов термальных вод. [11, 15-19, 21].

Краснодарский край также обладает значительными запасами геотермального тепла, имеет большой опыт использования геотермальных источников энергии. Таким образом, в эксплуатации находятся 50 геотермальных скважин, дающих воду объемом до 10 млн. м³ с температурой 75-110°C. В масштабе региона использование геотермальной энергии в Краснодарском крае позволит обеспечить до 10% всей потребности в тепле и до 3% всей потребности региона в энергии. Геотермальная энергетика имеет большие перспективы в Краснодарском крае. Суммарная тепловой потенциал находящихся в эксплуатации геотермальных полей составляет 238 МВт.

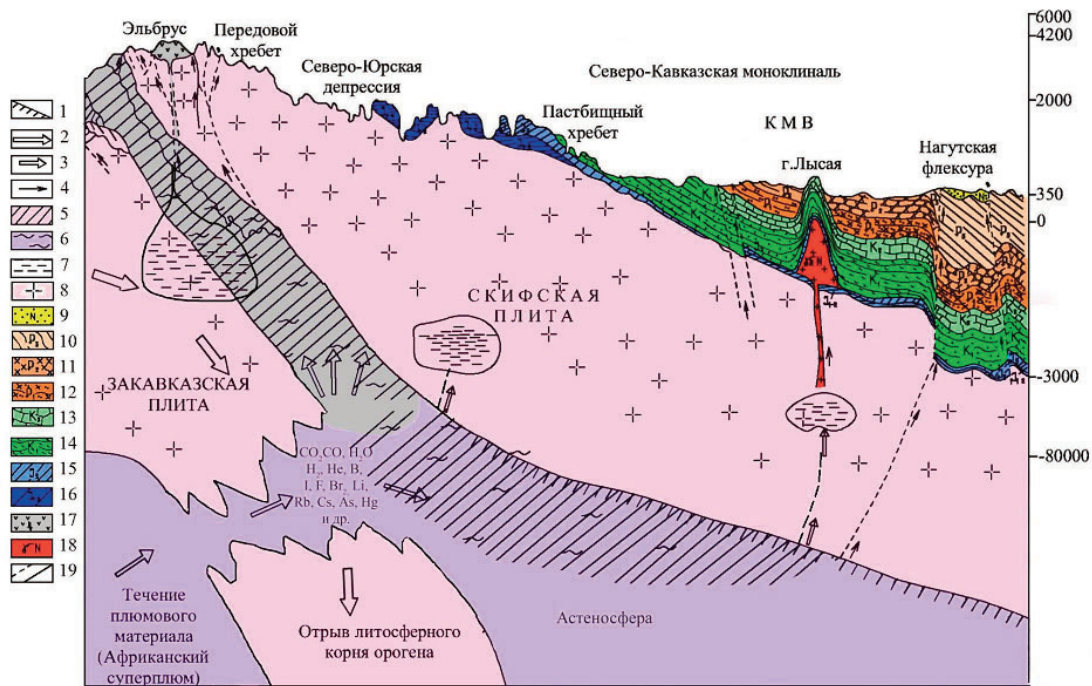


Рис. 4. Модель формирования углекислых гидротерм Большого Кавказа [8].
Справа по вертикали масштаб в метрах

1 — граница Мохо; 2 — преобладающее направление движения горных масс; 3 — пути перемещения мантийногенных флюидов; 4 — пути перемещения эндогенных коровых флюидов; 5 — скупивание литосферного материала; 6 — область базификации литосферного материала; 7 — внутрикоровые магматические очаги; 8 — доюрский фундамент Закавказской и Скифской плит; 9 — плиоценовые отложения (пески, глины, галечники); 10 — глины с прослоями мергелей; 11 — эоценовые отложения (мергели); 12 — палеоценовые отложения (мергели, аргиллиты, песчаники); 13 — известняки с прослоями мергелей; 14 — глинистые песчаники с прослоями аргиллитов; 15 — алевролиты, аргиллиты, конгломераты, гранитная древесина; 16 — аргиллиты, песчаники, вулканические туфы; 17 — неоген-четвертичные эффузивы влк. Эльбрус; 18 — неогеновые интрузии (криптолакколиты КМВ); 19 — тектонические нарушения

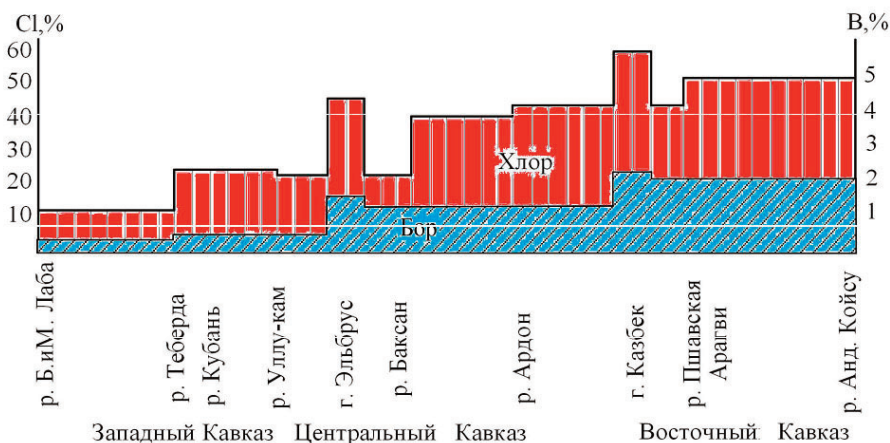


Рис. 5. Изменение содержания хлора и бора в углекислых водах Большого Кавказа в общей схеме их горизонтальной гидрогеохимической зональности от р. Лаба до р. Андийское Койсу [1, 2]

Обсуждение и выводы

Геотермальная энергетика и дальше будет развиваться в регионах, относящихся к «огненному поясу Земли». А в будущем передовые страны направят энергопотребление в сторону освоения петротермальных ресурсов, которые теоретически можно использовать в любой точке планеты. Имея большой опыт в бурении на нефть и газ, Россия может успешно развивать использование петротермальной энергии.

Геотермальная энергия имеет прямую географическую зависимость и концентрируется в зонах с тектоническими трещинами горных массивов и сейсмической активностью. Поэтому в некоторых регионах ее доля в энергетическом балансе составляет менее 1%, а в некоторых регионах повышается до 25-30% и больше. Баланс энергопотребления регионов также связан с наличием и запасами невозобновляемых источников энергии в странах (нефть, газ, уголь). Для России доля использования альтернативных источников в энергобалансе страны может составлять 3-4 %.

Камчатский край и Кавказский регион обладают богатыми запасами гидрогеотермальных и петротермальных ресурсов, что создает огромные перспективы развития рекреационно-туристического комплекса Камчатки, Курил, Сахалина, а также всего Кавказского региона и освоения системы Курорты Северного Кавказа.

Финансирование

Статья подготовлена в рамках выполнения госзадания № 122022400105- 9 по теме «Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий».

Литература

1. Масуренков Ю.П. Плотность теплового потока и глубина залегания магматического очага под вулканом Эльбрус // Бюлл. вулканологических станций. 1971. № 47. С. 79—82.
2. Масуренков Ю.П., Пахомов С.И. О геохимии хлора // Докл. АН СССР. 1961. Т. 159. № 2. С. 453—455.
3. Рогожин Е.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении. //Геотектоника. 2015. № 2. С. 36—49.
4. Свалова В.Б. Геоэкологические аспекты геодинамических процессов в литосфере. Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. 2023 г. 367 стр.
5. Свалова В. Б. Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование. //Геология и геофизика Юга России. 2021. 11 (3): 76 – 92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007.
6. Свалова В.Б. Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона. // Геология и геофизика Юга России. 2020. № 10(4). С. 52-69.
7. Свалова В.Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики // Геология и Геофизика Юга России. 2019. № 9 (3). С. 77-93.
8. Хаустов, В. В. Модель формирования углекислых гидротерм большого Кавказа с учетом особенностей его глубинной геодинамики // Электронное научное издание Альманах Пространствои Время. — 2013. — Т. 4. — Вып. 1: Система планета Земля — Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-aprov_east4-1.2013.24
9. Хуторской М. Д., Антоновская Г. Н., Басакина И. М., Тевелева Е. А. Сейсмичность и тепловой поток в обрамлении Восточно-Европейской платформы. //Вулканология и сейсмология, 2022, № 2, с. 74—92.
10. Шевченко В.И., Резанов И.Л. Тектоника и геофизические поля Крыма-Кавказа-Копетдага. //Проблемы геодинамики Кавказа. Отв. ред. Муратов М.В., Адамия Ш.А. М., Наука, 1982. С. 80-85.
11. Heat-mass transfer and geodynamics of the lithosphere /Svalova V.B. (Editor). 2021. Springer book: 89082526. 559 pp.
12. Hutter Gerald W. Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report.
13. //Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik, Iceland, April 26 – May 2, 2020, 39 pp.
14. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. //Solid Earth. 2012. № 3. P. 327–337.
15. Lund John W. and Toth Aniko N. Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. //Proceedings World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland, April - October 2021. 17 pp.
16. Svalova V.B. Geothermal resources complex utilization in Russia // 2018. Proceedings of the international geothermal conference GEOHEAT 2018, September 04-07. Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation. 8pp.
17. Svalova V.B. Mineral extraction from brines and geothermal resources complex use in Russia. //Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Indonesia, 7 pp, CD.

18. Svalova V.B. *Complex utilization of geothermal resources // CD Proceedings of IAEG Congress, 5-10 September 2010, Auckland, New Zealand, 7 pp.*
19. Svalova, V.B. *Geothermal Resources of Russia and Their Complex Utilization // Proceedings of AGEC2011 (Australian Geothermal Energy Conference 2011), Melbourne, Australia, 8pp.*
20. Svalova V. *Geothermal Energy Use in Russia. //Proceedings of The 4th African Rift Geothermal Conference (ARGeo C4) Nairobi, Kenya, 2012. 8 pp.*
21. Svalova, V., and Povarov, K.: *Geothermal Resources and Energy Use in Russia, //Proceedings World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, 2020.*
22. Zaalishvili V., Chotchaev Kh., Burdzieva O., Melkov D., Dzhgamadze A., Svalova V., Nikolaev A. *Prospects for identifying and applied use of hydro and petrothermal energy sources in geodynamically active structures of the eastern segment of the Central Caucasus // 2021. Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. /V. Svalova (ed.) Springer book: 89082526. P. 35-63.*

ОЦЕНКА ВЫНОСА ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Г.Ю. Толкачев

ФГБНУ «ФНЦ Гидротехники и Мелиорации им. А.Н. Костякова», 127434,
г. Москва, ул. Большая Академическая, 44 корпус 2
E-mail: contact@vniigim.ru

С точки зрения техногенной нагрузки наиболее опасными загрязняющими веществами являются тяжёлые металлы Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn и As. В качестве интегрального показателя техногенной нагрузки на водный объект рассматривается степень загрязнения донных отложений (ДО) – она является информацией об интенсивности и направленности инженерно-хозяйственной деятельности на водосборной территории, а также показатели работы очистных сооружений или их отсутствия. Водные объекты являются конечным звеном и потенциальным барьером в природно-техногенной ландшафтно-каскадной системе любой водосборной территории, при этом отсутствие формальной нормативной базы по содержанию микроэлементов в ДО водоёмов привело к различным и многообразным подходам и методам оценки техногенной нагрузки.

Режимные наблюдения за состоянием ДО водных объектов - необходимый элемент изучения их геоэкологического состояния, поскольку сами отложения аккумулируют и трансформируют техногенное воздействие, являясь при этом индикатором его уровня. Наличие и содержание тяжёлых металлов (ТМ) в ДО определяется гидродинамическими характеристиками потока, физико-химическими процессами, связанными с ТМ, а также их взаимодействием с квазистационарной сорбирующей фазой. Степень накопления либо выноса ТМ из ДО зависит от концентраций комплексных соединений, изменения pH, форм металлов, присутствующих в суспензионном материале и взаимодействия их катионов. Образование прочных растворимых комплексов с органическими лигандами – один из наиболее реальных путей десорбции ТМ из ДО. Активный необратимый восстановитель, взаимодействующий с «ионной» системой ДО – растворённое органическое вещество, образующееся при распаде захороненных органических осадков. Мощность окисленного слоя осадков определяется соотношением интенсивностей диффузионного потока O_2 через границу «вода – донные отложения» при распаде органического вещества – содержание O_2 в верхнем слое ДО и, соответственно, в придонном слое водной массы водоёма – непосредственно влияет на процессы накопления-выноса ТМ в системе «вода-дно». Валовое содержание ТМ является важным показателем, однако оно ещё не указывает на опасность токсических эффектов при вторичном загрязнении водных масс. В большинстве исследований, посвящённых частицам металлов в природных водных системах (т.е. металлам, связанным с взвешенными веществами или донными отложениями), рассматривается общая концентрация металлов. Вместе с тем необходимо оценивать их содержание и распределение по формам существования в ДО – поскольку именно от форм существования зависит их миграция и массообмен в системе «вода-дно».

Объекты и методы исследования

Отбор проб ДО осуществляется в зависимости от целей исследований. Водный объект разбивается на серию створов – в каждом створе пробы ДО должны характеризовать водный объект или его часть за определенный промежуток времени, объем проб должен быть достаточным для выполнения запланированных аналитических лабораторных исследований. В каждом створе отбирается 1–3 пробы в зависимости от гидрологических характеристик и их особенностей на данном участке водного объекта. При использовании методики достаточно отбирать пробы весом 300–500 грамм. Далее выделяется «сорбирующая фракция» размером менее 0,020 мм – мокрым просеиванием, выпаривается и высушивается, до воздушно-сухого состояния в сушильных шкафах при температуре не выше +60°C. При длительном хранении пробы рекомендуется замораживать до –20°C. Определение концентраций тяжёлых металлов в пробах ДО проводится методами ИСП и атомной адсорбции (Cd) – после их разложения в «царской водке». Обоснование точек отбора не носит унифицированного характера, т.к. участки различных категорий являются в некоторой степени уникальными и требуют

индивидуального подхода. В целом необходимо соблюдать принципы, изложенные в предыдущих публикациях [3, 4].

При изучении загрязнения ДО ТМ существует устоявшийся подход в виде учёта гранулометрического состава отложений [3, 4]. В работе приведены уровни содержания в ДО тяжёлых металлов – Cr, Co, Ni, Zn, Cd, Pb, As, а также Fe и Mn. Уровень аккумуляции ТМ в ДО оценивался с помощью «индекса геоаккумуляции» [6], который характеризует относительную кратность загрязнения донных отложений (против природного фона) во фракциях грунта <20 мкм:

$$I\text{-geo, } n = \log_2 (C_n/1,5B_n) \quad (1);$$

где C_n – измеренная концентрация элемента n в донных отложениях (фракция менее 20 мкм); B_n – геохимическая фоновая концентрация элемента n [2, 8].

На основании этого уравнения ДО подразделяются на классы качества по каждому тяжелому металлу и As. Выражение $C_n/1,5B_n$ представляет собой коэффициент накопления, где фоновое значение дается с определенным запасом. На основе данной классификации могут составляться карты загрязнения донных отложений по каждому элементу.

При определении распределения ТМ по формам существования особое внимание уделялось выбору фракций ДО (активные формы), на которые могут повлиять различные условия окружающей среды. Использовался метод [7], позволяющий определить, с какими компонентами ДО связываются те или иные микроэлементы. Применение последовательных экстракций, хотя и требует значительного времени, предоставляет подробную информацию о происхождении, способе появления, биологической и физико-химической доступности, мобилизации и транспорте микроэлементов. Фракция 1 – микроэлементы в обменном комплексе ДО. Изменения ионного состава природных вод влияют на процессы сорбции-десорбции. Фракция 2 – микроэлементы, связанные с карбонатами. Эта фракция очень восприимчива к изменениям pH среды. Фракция 3 – микроэлементы, связанные с оксидами железа и марганца. Фракция 4 – микроэлементы, связанные с органическим веществом ДО. В условиях окисления в природных водах органическое вещество может разлагаться, что приводит к выделению растворимых микроэлементов.

Обсуждение результатов

Сложность кинематической структуры потока в водоёмах не позволяет выполнить моделирование процессов выхода загрязняющих веществ, в частности ТМ из ДО в воду. Поэтому целью экспериментальных исследований является не моделирование многофакторных процессов выхода загрязняющих веществ из ДО, а постановка опытов, позволяющих непосредственно определить параметры, определяющие поток элементов из ДО. Для определения этих параметров проводился статический эксперимент по методике [5]. В результате эксперимента для Cu и Zn установлено следующее. При поглощении Cu происходит её аккумуляция на ДО. В отсутствие сильного воздействия на структуру, а также ряда агентов, способных перевести труднорастворимые формы в легкорастворимые, выделения в воду поглощённой Cu не наблюдается в течение длительного времени. Даже в условиях интенсивного ресуспензирования и реокисления осадков, при варьировании температуры от 0 до 20, содержания растворённого кислорода от 0 до 100% насыщения и величины pH 7,8-8,8 выделения Cu не происходит. Рассматривая изменения концентрации Zn, следует отметить, что влияющие на десорбцию Zn факторы идентичны факторам, влияющим на десорбцию Cu. Влияние pH на десорбцию незначительно.

На основании ранее проведённых исследований возможно сделать следующие выводы: изменение содержания ТМ в подвижных формах способствует изменению их валового содержания в ДО, при этом высокая изменчивость содержания подвижных форм ТМ отмечается в верхнем 10-см слое ДО, который активно вовлекается в процесс массообмена с водной массой водоёма [1]. Необходимо подчеркнуть, что все подвижные формы могут участвовать в процессах массопереноса в системе «твёрдая фаза – поровый раствор – вода», а их содержание зависит от ряда факторов: меняющегося соотношения приходной и расходной составляющих баланса веществ, гидродинамической обстановки в придонном слое, физико-химических условий в верхнем 10-см слое ДО.

Сравнение массы ТМ в твёрдой фазе и поровом растворе 10-сантиметрового слоя ДО показывает, что доля запасов ТМ в поровом растворе практически всех элементов в летний период незначи-

тельна (по материалам летней съёмки). Необходимо подчеркнуть, что роль порового раствора в процессах вторичного загрязнения водных масс водохранилища не ограничивается запасами растворённых элементов. Часть ТМ, закреплённая в твёрдой фазе ДО, в определённых условиях переходит в поровый раствор и далее в водную массу, и переход ТМ из ДО в водную массу осуществляется транзитом через поровый раствор. При этом выполненные для Иваньковского водохранилища оценки показывают, что ни диффузионный вынос, ни фильтрация не могут быть реальными механизмами выноса микроэлементов из ДО в водную массу. Вероятно, основной причиной выноса является макроперенос за счет русловых процессов.

Для расчёта масс ТМ в твёрдой фазе верхнего 10 сантиметрового слоя ДО принимаются следующие средние значения характеристик фракции <0,02мм: плотность осадков – 1,5 г/см³; пористость верхнего горизонта – 0,6. Следовательно, вес призмы твёрдой фазы илистых отложений размером 1,0м*1,0м*0,1м = 150 кг. Оценка содержания накопленных масс ТМ в изучаемом слое ДО основана на распределении по классам геоаккумуляции, и позволяет оценить массу **m** каждого ТМ в активном слое ДО на площади 1м² (Таблица 1). Данный подход позволяет определять районы с относительно равномерным загрязнением ДО, рассчитывать их приблизительную площадь и затем – максимально возможный вынос ТМ в водную толщу.

Таблица

Распределение значений накопленной массы ТМ в призме ДО 1,0м*1,0м*0,1м по классам геоаккумуляции (игео-классам)

| Эл-т | Фон | Накопленная масса по классам геоаккумуляции (г) | | | | | | |
|-----------|-------|---|-------|------|-------|-------|-------|---------|
| | (г) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Mn | 127,5 | 191 | 382,5 | 765 | 1530 | 3060 | 6120 | > 6120 |
| Cd | 0,045 | 0,07 | 0,135 | 0,27 | 0,54 | 1,08 | 2,16 | > 2,16 |
| Zn | 14,25 | 21,4 | 42,8 | 85,6 | 171,2 | 342,4 | 684,8 | > 684,8 |
| Pb | 3 | 4,5 | 9 | 18 | 36 | 72 | 144 | > 144 |
| Cu | 6,75 | 10,1 | 20,2 | 40,4 | 80,8 | 161,6 | 323,2 | > 323,2 |
| Ni | 10,2 | 15,3 | 30,6 | 61,2 | 122,4 | 244,8 | 490 | > 490 |
| Co | 2,85 | 4,3 | 8,6 | 17,2 | 34,4 | 68,8 | 138 | > 138 |
| Cr | 13,5 | 20,2 | 40,4 | 80,8 | 161,6 | 323,2 | 646 | > 646 |
| As | 2 | 2,9 | 5,8 | 11,6 | 23 | 46 | 84 | > 84 |
| Hg | 0,06 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 1,6 | 3,2 | > 3,2 |

Таким образом, представляется возможным провести районирование ДО по площади в зависимости от уровня игео-класса накопленной массы (или запасов) ТМ. В результате отбора и анализа проб ДО определяются приблизительные площади содержания ТМ для каждого игео-класса. Затем в соответствии с данными Таблицы 1 рассчитывается накопленная масса определённого металла для площади каждого района – далее M_{I-geo} . Далее, путём суммирования массы ТМ для каждого игео-класса, возможно оценить общую накопленную массу ТМ для ДО всего водоёма:

$$\begin{aligned} M_{I-geo} &= m \cdot S_{I-geo} \\ M_{общ} &= \sum M_{I-geo} \end{aligned} \quad (2);$$

где m – масса каждого ТМ в активном слое ДО на площади 1м²; S_{I-geo} – площадь содержания ТМ в ДО определённого игео-класса; $M_{общ}$ – суммарная накопленная масса ТМ по всей площади ДО водоёма; M_{I-geo} – накопленная масса ТМ по определённому игео-классу в отдельном районе ДО.

В результате районирования и унификации содержания ТМ по игео-классам существенно упрощается оценка количества ТМ в ДО как для каждого района водоёма, так и для всего водоёма в целом.

В водоёме в период летней межени, при сухой погоде, может практически целиком прекращаться поступление водных масс с осадками и с водосборной территории. Вследствие этого может суще-

ственно понижаться уровень водоёма, и соответственно, уменьшаться его объём. В результате в проточных водоёмах снижаются скорости течений, начинается стагнация, евтрофикация и заморные явления. При этом существенно возрастает объём забираемой воды для сельскохозяйственного водопользования – полива растений и поения животных – различных прибрежных фермерских хозяйств. Вместе с тем, в условиях стагнации водоёма, как правило существенно ухудшается гидрохимическая обстановка – снижается содержание O_2 , особенно в придонном слое, а также показатели рН в придонном слое воды и в ДО, что свидетельствует о подкислении системы «вода-ДО» и переходе от окислительных условий к восстановительным, что в свою очередь приводит к опасности вторичного загрязнения. В данных условиях возможен переход ТМ, находящихся в подвижных формах существования в ДО, в водную массу – как было указано выше, практически в полном объёме в течение одной-двух недель. Накопленная масса ТМ после выхода из ДО распространяется в водной среде водоёма, в результате чего в воде возрастают содержания металлов – вынесенные из отложений массы добавляются к уже имеющимся концентрациям. Для оценки максимально возможного влияния выноса масс ТМ из ДО предполагается, что из подвижных форм отложений выйдет полностью все содержание изучаемых элементов. Также для оценки принимается утверждение, что при выше приведённых условиях уровень водоёма – и, следовательно, объём – будет минимальный; при этом количество вынесенных металлов распространяется по всему объёму водных масс. Таким образом, возможно рассчитать потенциально максимальное вынесенное количество каждого металла в воду водоёма в результате вторичного загрязнения. Расчёт может быть произведён по формуле (3), и далее можно рассчитать общую концентрацию каждого металла в воде – путём сложения концентрации, добавившейся в результате выноса, и уже имеющейся концентрации в водной массе.

$$\begin{aligned} C_3 &= M_{\text{общ}}/V \\ C_{\text{общ}} &= C_3 + C_{\text{в}} \end{aligned} \quad (3);$$

где $C_{\text{общ}}$ – общая концентрация ТМ в результате выноса из ДО; C_3 – концентрация ТМ, добавленная (вынесенная) в водную массу из ДО; $M_{\text{общ}}$ – суммарная накопленная масса ТМ по всей площади ДО водоёма; V – объём водной массы водоёма. $C_{\text{в}}$ – концентрация ТМ в воде перед выносом из ДО.

Как следует из формулы (2), в засушливые летние меженные периоды, с потенциальным ухудшением качества воды в водоёмах, перед водопользованием необходимо измерять содержания ТМ в воде, рассчитывать объём водной массы и давать оценку накопленным массам ТМ в ДО. Данные расчёты можно проводить как на отдельных водоёмах, так и на отдельных участках средних и крупных рек, на которых расположены сельхозугодья и предполагается активное водопользование. По результатам расчёта общей концентрации ($C_{\text{общ}}$) ТМ в воде исследуемого водоёма, можно принимать решение о целесообразности и правомерности использования его воды в сельскохозяйственных целях.

Выводы

Загрязнение ДО водного объекта отражает его современное состояние и несет информацию об инженерно-хозяйственной деятельности на водосборной территории, при этом фракция ДО <20 мкм способна удовлетворять требованиям мониторинга водного объекта, инвентаризации и оценки содержания ТМ. Их аккумуляцию в ДО рекомендуется оценивать с помощью «индекса геоаккумуляции», который характеризует относительную кратность загрязнения ДО (против природного фона) во фракциях <20 мкм.

Представляется возможным провести районирование ДО по площади в зависимости от уровня игео-класса накопленной массы (или запасов) ТМ. В результате отбора и анализа проб ДО определяются приблизительные площади содержания ТМ для каждого игео-класса. В результате районирования и унификации содержания ТМ по игео-классам существенно упрощается оценка количества ТМ в ДО как для каждого района водоёма, так и для всего водоёма в целом.

Для оценки влияния выноса ТМ из ДО на воду водного объекта, необходимо рассчитать добавленное содержание каждого металла в водную массу. Далее рассчитывается общая концентрация каждого металла в воде в результате выноса – путём сложения концентрации, добавившейся в результате выноса, и уже имеющейся концентрации в водной массе. По результатам расчёта общей

концентрации ТМ в воде водного объекта принимается решение о использовании его воды в сельскохозяйственных целях.

Литература

1. *Бреховских В.Ф., Волкова З.В. О накоплении тяжелых металлов в донных отложениях Иваньковского водохранилища // Мелиорация и водное хозяйство, 1998, № 3, с. 15 - 16.*
2. *Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 235 с.*
3. *Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Ильина Т.А., Гетьман Е.Н. Оценка техногенной нагрузки на водные объекты по загрязненности донных отложений // Мелиорация и водное хозяйство. 2015. № 6. с. 15-19.*
4. *Корженевский Б.И., Толкачев Г.Ю., Ильина Т.А., Коломийцев Н.В. Основные принципы мониторинга загрязнения большой реки (на примере бассейна реки Волги) // СтройМного. 2017. № 2 (7). с. 1/7-7/7.*
5. *Майрановский Ф. Г. Влияние сорбционных процессов на формирование качества воды в водохранилищах // Гидродинамика поверхностного стока и прогнозы качества воды. М.: Наука. 1982. С. 58-65.*
6. *Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins - Veraenderungen seit 1971 // Umschau 79. 1979. H. 24. s. 778-783.*
7. *Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals // Analytical chemistry. 1979. Vol. 51. No 7. P. 844-851.*
8. *Turekian K.K., Wedepohl K.H. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust // Geological Society of America, Bulletin. 1961. Vol. 72. P. 175-192.*

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ

В.Т. Трофимов

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1
E-mail: trofimov@rector.msu.ru

Массив грунтов¹ при экологически ориентированных исследованиях должен рассматриваться в качестве эколого-геологической системы. Эти системы представляют собой определенный (в принципе любой по размерам) объем литосферы с функционирующей непосредственно в нем или на его поверхности биотой, включая человека и социум. По структуре они представляют собой сложные многофакторные динамические образования, изменяющиеся под влиянием природных или природных и техногенных процессов, причем изменяющиеся очень быстро даже в физической временной системе, а с точки зрения геологического времени – практически мгновенно.

Эколого-геологические системы – объект экологической геологии – нового направления геологических наук, исследующего влияние геологических факторов на функционирование Живого. Эти системы – и объект экологических исследований в целом. Естественно встал вопрос – как были отражены эти два названных положения в структуре классических представлений об экосистемах – объекте изучения экологии?

Термин *экосистема* (экологическая система) был введен в научную литературу еще в 1935 году английским ботаником А. Тенсли, который рассматривал экосистему как совокупность комплексов организмов с комплексом физических факторов его окружения, то есть факторов местообитания в широком смысле.

Близкое по содержанию определение экосистемы дает и Ю. Одум. В его книге «Основы экологии» (1975 г.) в качестве экосистемы рассматривалась любая единица (биосистема), включающая все совместно функционирующие организмы (биотическое сообщество) на данном участке и взаимодействующая с физической средой таким образом, что поток энергии создает четко определенные биотические структуры и круговорот веществ между живой и неживой частями. Литосферные факторы в классификации экологических факторов, составленной Ю. Одумом, не учтены. Их нет и в схеме биогеоценоза В.Н. Сукачева (1972 г.). *Отсутствие в структуре экосистем литотопа – это, по существу принципиальная ошибка, поскольку на существование и развитие и биогеоценоза, и экосистемы (более широкое понятие) влияют не только «почвы» или «почвы, грунты» (что показано в схеме биогеоценоза Г.А. Новиковым в 1979 году), но и верхние горизонты литосферы в целом – их состав, подземные воды, геохимические и геофизические поля, современные эндо-, экзо- и техногенные процессы.*

Схема структуры экосистемы, составленная с учетом ранее сформулированных позиций, опыта построения схем биогеоценоза, а также изучения современной экологией системы природа–человек–общество и классов воздействий на нее, показана на рис. 1. Главные в ней – введение в структуру экотопа, экосистемы в целом **литотопа**, его параметров, влияющих на функционирование Живого. Эта структура свидетельствует, что эколого-геологическая система представляет собой лишь часть экосистемы, входит в ее состав, но часть большую и очень важную.

Какие же параметры массивов грунтов как литотопа следует оценивать при экологически ориентированных работах? Вопрос не простой, так как параметров очень много. Прагматический и теоретический ответ на этот вопрос принят таким – те характеристики, которые обеспечивают и влияют на функционирование биоты, включая социум. На рис. 1 к ним отнесены: 1) состав, состояние, строение и рельеф массива; 2) подземные воды; 3) геохимические поля; 4) геофизические

¹ Напомним, что под грунтами понимаются любые горные породы, почвы, осадки и антропогенные породоподобные геологические образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамичные системы и исследуемые в связи с планируемой, осуществляемой или осуществленной инженерной деятельностью человека. В общем случае грунт – это минеральная или минерально-органическая, органико-минеральная, многокомпонентная, многофазовая система, которая включает твердую, жидкую и газообразную компоненты (как косную, так и живую) и изучается в инженерно-геологическом отношении.

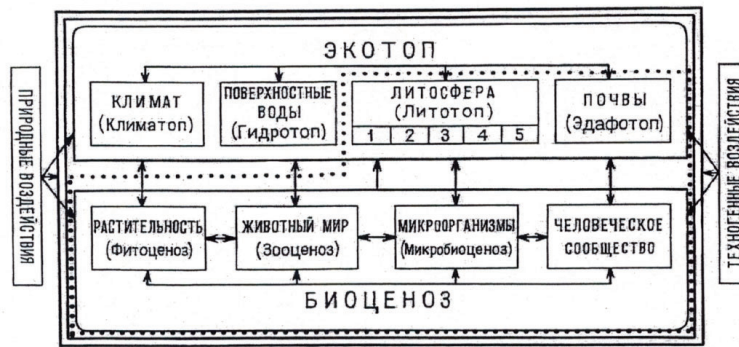


Рис. 1. Схема структуры экосистемы с учетом геологической составляющей и классов воздействий на нее. Точками выделены границы эколого-геологической системы. 1–5 – параметры литосферы: 1 – состав, строение и рельеф массива; 2 – подземные воды; 3 – геохимические поля; 4 – геофизические поля; 5 – современные эндо-, экзо- и техногенные процессы (по В. Т. Трофимову, 2009 [6, 7])

поля; 5) современные эндо-, экзо- и техногенные процессы. Именно эти параметры (точнее группы параметров) определяют и экологические условия массивов грунтов (табл. 1).

Таблица 1

Факторы эколого-геологических условий и факторы формирования эколого-геологических условий

| Факторы (компоненты) эколого-геологических условий | | Факторы формирования эколого-геологических условий | | |
|--|--|--|--|-----------------------------|
| Региональные геологические | 1. Мега- и мезорельеф. 2. Состав, строение и свойства пород, условия их залегания и распространения. 3. Условия залегания и химический состав подземных вод глубоких горизонтов. 4. Геохимические поля, их неоднородность. 5. Геофизические поля, их неоднородность. 6. Характер эндогенных и экзогенных геологических процессов | Региональные геологические | 1. Совокупность геологических процессов, реализованных в ходе истории геологического развития территории. 2. Современное тектоническое развитие территории | Антропогенные (техногенные) |
| Зональные геологические и ландшафтные | 1. Современное состояние пород, их состав и свойства. 2. Глубина залегания и химический состав грунтовых вод. 3. Характер и интенсивность экзогенных геологических процессов. 4. Ландшафтные особенности | Зональные в основном климатические | 1. Теплообеспеченность территории. 2. Увлажненность территории. 3. Соотношение теплообеспеченности и увлажненности территории. 4. Ландшафтные особенности | |

Но составляющих и определяющих экологическое содержание этих групп факторов–параметров велико. Из них следует изучать только те, которые определяют *экологические функции литосферы*². Под ними понимается *все многообразие функций, определяющих и отражающих роль и значение литосферы, включая подземные воды, нефть, газы, геохимические, геофизические поля и протекающие в ней геологические процессы, в жизнеобеспечении биоты и человеческого сообщества.*

Научная концепция экологических функций литосферы объединяет в единый круг рассматриваемых проблем многоплановое изучение роли литосферы как среды существования органической жизни – простейших ее форм, растительного и животного мира и человеческой популяции. Основное с экологических позиций «предназначение» – ресурсное и энергетическое жизнеобеспечение биоты – реализуется через ресурсную, геодинамическую, геофизическую и геохимическую функции (рис. 2). Социально-экономические, нравственные, эстетические аспекты функциональных взаимодействий человека и природы авторы оставляют за рамками рассмотрения, так как они выходят

² Содержание понятия «экологическая геология» определяется через это понятие так: это геологическая наука, изучающая экологические функции литосферы, закономерности их формирования и пространственно-временного изменения под влиянием природных и техногенных причин в связи с жизнью и деятельностью биоты, включая человека.

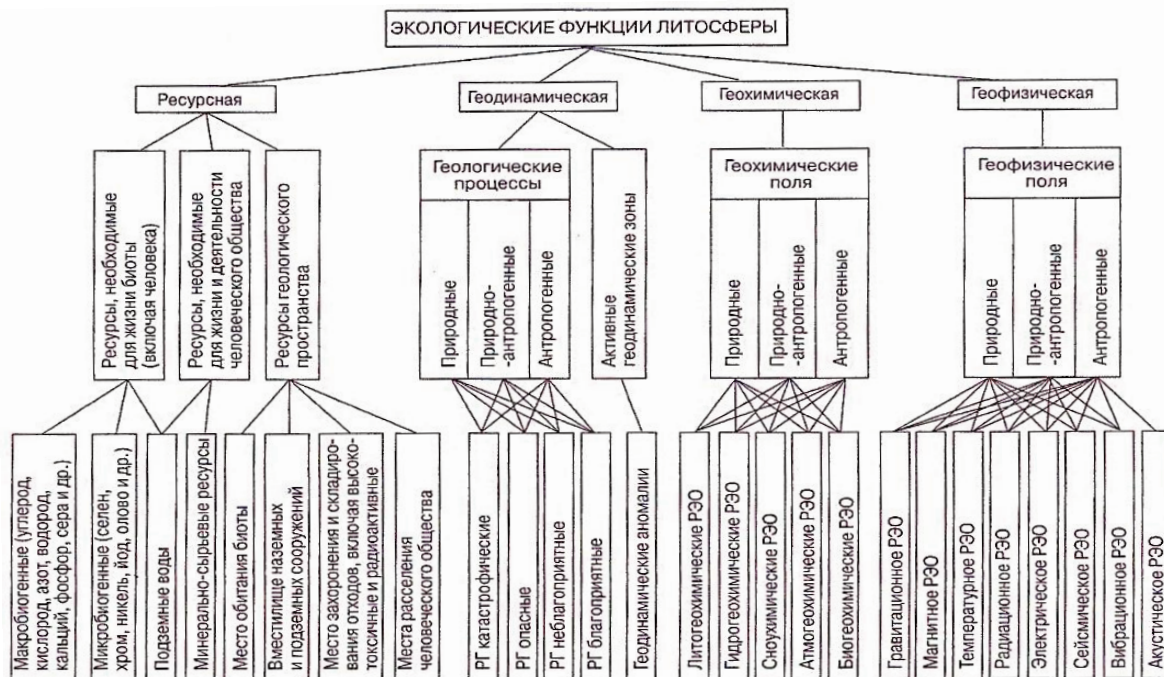


Рис. 2. Систематика экологических функций литосферы и их составляющих (по [7, 8]): РГ – разного генезиса; РЭО – разной экологической опасности



Рис. 3. Систематика типов показателей и критериев, используемых при оценке эколого-геологических условий (по В.Т. Трофимову и Д.Г. Зилингу, [7])

за пределы профессиональных геологических знаний и, как нам представляется, составляют сферу интересов социальной экологии.

Определим содержание названных функций:

- ресурсная экологическая функция литосферы – функция, определяющая роль минеральных, органических и органоминеральных ресурсов и геологического пространства литосферы для жизни и деятельности биоты как в качестве биогеоценоза, так и социальной структуры;

- *геодинамическая экологическая функция литосферы* – функция, отражающая свойства литосферы влиять на состояние биоты, безопасность и комфортность проживания человека через природные и антропогенные процессы и явления;
- *геохимическая экологическая функция литосферы* – функция, отражающая свойство геохимических полей (неоднородностей) литосферы природного и техногенного происхождения влиять на состояние биоты в целом, включая человека, в частности;
- *геофизическая экологическая функция литосферы* – функция, отражающая свойства геофизических полей (неоднородностей) литосферы природного и техногенного происхождения влиять на состояние биоты, включая человека.

Характеристика экологических функций литосферы требует получения в процессе экологически ориентированного изучения массивов грунтов большого количества геологических показателей (табл. 2). Но одних таких показателей для оценки состояния эколого-геологической системы, экосистемы в целом недостаточно. Необходимы данные о состоянии Живого. А это требует изучения и биотических, и биолого-медицинских, и социально-экономических показателей (рис. 3).

Многие показатели этих групп нормированы и опубликованы в сводах правил по проведению инженерно-экологических изысканий для строительства [2–5]. Методика экспериментального получения многих из них приведена в ряде этих документов. Дополнительно охарактеризуем подразделение современных геологических процессов, которым в первых строительных нормах и правилах [5] и сводах правил [2, 4] уделялось малое внимание.

В первых разработках сотрудников кафедры инженерной и экологической геологии в систематике этих процессов выделялись три группы процессов: *катастрофические, опасные и неблагоприятные*. В дальнейшем в эту схему были на том же уровне введены процессы *благоприятные*. Эта систематика показана с небольшими добавлениями на рис. 4.

В этом построении выделены **четыре блока процессов**: катастрофические, опасные, неблагоприятные и благоприятные. Первые, катастрофические геологические процессы, представляют непосредственную угрозу жизни и характеризуются неопределенностью момента возникновения и высокой интенсивностью проявления. К ним относят землетрясения, извержения вулканов, цунами, нагоны, наводнения, оползни, сели, обвалы, провалы и др. Непосредственная угроза жизни человека возникает только при определенной интенсивности проявления процесса (скорости, амплитуде, высоте подъема, радиусе действия и др.).

Опасные процессы (засуха, опустынивание, эрозия, карст и др.) оказывают непосредственное воздействие (механическое, химическое и др.) на абиотическую составляющую экосистемы и только опосредованно, через ее изменение или разрушение, на флору, живые организмы и человека. Они угрожают жизни, но их проявление растянуто во времени и сопоставимо с человеческой жизнью.

Неблагоприятные геологические процессы (заболачивание, суффозия, пучение, наледообразование, морозобойное растрескивание и др.), не представляющие непосредственной угрозы для жизни, негативно воздействуют на условия жизнедеятельности человека через деформацию и осложнение эксплуатации инженерных сооружений и влияют на существование биоты через деградацию почв. Это процессы длительного действия, с продолжительным периодом подготовки, с отдаленными и опосредованными экологическими последствиями как для человека, так и всего живого.

Благоприятные процессы (выветривание, аккумуляция, увлажнение, осушение) позитивно влияют на условия существования биоты и опосредованно на комфортность проживания человека за счет увеличения ресурса геологического пространства или его качества.

Важное значение для эколого-геологических работ, инженерно-экологических изысканий в целом, имел выпуск строительных норм и правил СНиП 22-01-95 «Геофизика опасных природных воздействий» и его актуализированный вариант – свод правил СП 115.13330.2016 [1]. В последнем документе присутствует таблица, в которой выделены и охарактеризованы показатели, используемые при оценке категории опасности природного процесса, и четыре категории опасности процессов – чрезвычайно опасные (катастрофические), весьма опасные, опасные, умеренно опасные. Границы каждой из этих категорий для 20 природных процессов охарактеризованы численными показателями.

Геологические объекты и параметры, изучаемые в процессе инженерно-экологических изысканий [7, 8]

| Исследуемые геологические параметры (показатели) | Компоненты литосферы | | | | | | |
|---|----------------------|-------------|-------|---------------|----------------|-----------|-------------|
| | грунты | | почвы | донные осадки | подземные воды | газы | |
| | природные | техногенные | | | | природные | техногенные |
| Сейсмические зоны | + | - | - | - | - | - | - |
| Литолого-фациальные | + | - | - | - | - | - | - |
| Структурно-текстурные | + | - | - | + | - | - | - |
| Физико-механические | + | - | - | - | - | - | - |
| Физико-химические и химические | + | + | + | + | + | - | - |
| Водно-физические | + | + | + | + | + | - | - |
| Фильтрационные | + | + | + | + | - | - | - |
| Сорбционные и миграционные | + | - | + | + | - | - | - |
| Емкость катионного обмена | + | - | + | - | - | - | - |
| Электропроводность | + | - | + | - | - | - | - |
| Геохимический состав | + | + | + | + | + | - | + |
| Геохимические аномалии | + | + | + | + | + | - | - |
| Гамма-излучение | + | + | + | + | - | - | - |
| Состав и содержание солей в водной вытяжке | + | - | + | - | - | - | - |
| Оторфованность | + | - | + | - | - | - | - |
| Газогенерирующие грунты | - | + | - | - | - | - | - |
| Активность потока биогаза | - | + | - | - | - | - | + |
| Наличие метана и CO ₂ в грунтовой атмосфере | - | + | - | - | - | - | + |
| Газогеохимические аномалии | - | + | - | - | - | + | + |
| Газонасыщенность грунтов | - | + | - | - | - | - | - |
| Газогенерационная способность грунтов | - | + | - | - | - | - | - |
| Активность метаногенерирующей и метанооксилирующей способности микрофлоры в грунтах | - | + | - | - | - | - | - |
| Температурный и водный режим | + | + | + | + | + | - | - |
| Распределение преобладающих типов и подтипов почв | - | - | + | - | - | - | - |
| Характеристики почвенного профиля | - | - | + | - | - | - | - |
| Содержание гумуса | - | - | + | - | - | - | - |
| Насыщенность основаниями | - | - | + | - | - | - | - |
| Содержание общего азота | - | - | + | - | - | - | - |
| Содержание подвижного фосфора и калия | - | - | + | - | - | - | - |
| Эродированность | - | - | + | - | - | - | - |
| Биологическая активность | - | - | + | - | - | - | - |
| Объемная активность радона в почвенном воздухе | - | - | + | - | - | + | - |
| Плотность потока радона на поверхности грунта | + | + | + | - | - | - | - |
| Наличие и условия залегания водоупоров | + | - | - | - | + | - | - |
| Естественные и искусственные гидродинамические границы | - | - | - | - | + | - | - |
| Проницаемость пород зоны аэрации, водовмещающих и перекрывающих | + | - | - | - | + | - | - |

Итог рассмотрения: казалось бы, теоретически все ясно и понятно. Но в результате практической деятельности возникает значительное число *неопределенностей* при оценке категории опасности природных (да и антропогенных) процессов. Это обусловлено зависимостью оценки категорий опасности природных процессов не только от природных факторов, но и социальных причин – плотности населения, научно-технического уровня развития общества и территориальной принадлежности. В силу этого далеко не каждое проявление опасного процесса, даже катастрофического (по классификациям), сопровождается человеческими жертвами, разрушением экосистем.

Изучение всех экологически значимых геологических характеристик наиболее детально изучают при выполнении инженерных изысканий для строительства. Они, в соответствии с СП 47.13330.2016, пункт 4.1 [4], рассматриваются как *обязательная часть градостроительной деятельности, обеспечивающая комплексное изучение природных условий территории (региона, района, площади, участка, трассы) и факторов техногенного воздействия на территорию объектов капитального строительства для решения следующих задач* (курсив мой. – В.Т.).



Рис. 4. Систематика природных процессов по характеру воздействия на эколого-геологические системы и человека

Инженерные изыскания выполняются для: 1) подготовки документов территориального планирования; 2) подготовки документации по планировке территории; 3) выбора площадок (трасс) строительства; 4) архитектурно-строительного проектирования; 5) строительства и реконструкции объектов капитального строительства; 6) капитального ремонта автомобильных дорог общего пользования. Работы, обозначенные цифрами 1, 2 и 3, в восьмидесятых и девяностых годах прошлого века относились к предпроектным (стадии – схема и технико-экономическое обоснование), цифрой 4 – к проектным (стадии – проект и рабочая документация).

Инженерные изыскания в соответствии с СП 47.13330.2016 [4] включают 5 основных и 6 специальных видов изысканий. К первым, *основным видам инженерных изысканий* относятся инженерно-геодезические, инженерно-геологические, инженерно-гидрометеорологические, инженерно-экологические, инженерно-геотехнические. В названном своде правил инженерно-геотехнические изыскания рассматриваются в составе инженерно-геологических изысканий. *Инженерно-экологические изыскания* выполняются для получения материалов и данных о состоянии компонентов окружающей среды и возможных источниках ее загрязнения, необходимых для подготовки всех ранее названных документов.

При инженерно-экологических изысканиях на любой стадии их проведения *изучается, анализируется система геологических объектов, влияющих на состояние экологической обстановки*. К их числу относятся природные и техногенные грунты, почвы, донные осадки, подземные воды, природные и техногенные газы, являющиеся составными компонентами литосферы. Для этих геологических объектов в процессе инженерно-экологических изысканий и в СП 11-102-97 [2] и в СП 502.1325800.2021 [3] предусмотрено изучение большого числа параметров. В наглядной форме это было представлено в табл. 2. Методы исследования и оценки этих параметров нормированы в СП 502.1325800.2021.

Геологические объекты и характеризующие их параметры изучаются в ходе инженерно-экологических изысканий для обоснования и подготовки документов при различных видах градостроительной деятельности. Объемы решаемых задач и получаемой информации в процессе их выполнения на разных этапах этой деятельности неодинаковы (это схематично показано на рис. 5). С переходом от первого этапа этой деятельности к последующим сокращаются размеры изучаемого в процессе инженерно-экологических изысканий пространства; усложняются виды и объемы инженерно-экологических и других специальных работ; возрастают требования к точности инженерно-экологических оценок, прогнозов и рекомендаций.

Подчеркнем, что основы методики и основные методы полевых, специальных и лабораторных исследований инженерно-экологических изысканий (включая их эколого-геологическую составляющую), проводимых для получения необходимых и достаточных материалов для обоснования и подготовки документов при различных видах градостроительной деятельности, стали достаточно

| Виды подготовки документации | ТП | ПТ | ВПТ | АРСП | | СЗС | РЗС | КРАД |
|------------------------------|----|----|-----|------|------|-----|-----|------|
| | | | | ПД | ПДII | | | |
| Объемы ИЭК информации | | | | | | | | |

Рис. 5. Соотношение объемов инженерно-экологической (ИЭК) информации, получаемой в процессе инженерно-экологических изысканий для подготовки документов территориального планирования (ТП), документации по планированию территории (ПТ), выбора площадок (трасс) строительства (ВПТ), архитектурно-строительного проектирования (АРСП) при подготовке проектов капитального строительства – первый этап (ПД) и второй этап (ПДII), при строительстве (СЗС) и реконструкции зданий и сооружений (РЗС), подготовке документации капитального ремонта автомобильных дорог общего пользования (КРАД)

стабильными. Меняется значимость того или иного метода, его роль в получении экологической информации, но не основы их перечня. Сказанное относится и к исследуемым геологическим параметрам: они остаются прежними, но изменяется детальность их изучения, необходимость получения количественных характеристик, а, следовательно, частота и детальность опробования. К этому добавим, что объем эколого-геологической составляющей в составе инженерно-экологических изысканий существенен (табл. 3).

Таблица 3

Статистика по составу работ на изучение компонент экосистем в нормативно-технических документах (составила М.А. Харькина)

| Компоненты экосистем | Количество позиций, регламентирующих состав работ инженерно-экологических изысканий в нормативах | | | | | |
|---|---|--|------------------|---|-----|----|
| | СП 11–102–97 (регламентируют только инженерно-экологические изыскания) | СП 47.13330.2012 | СП 47.13330.2016 | СП 502.1325800.2021 (регламентируют только инженерно-экологические изыскания) | | |
| | | (регламентируют инженерно-геодезические, инженерно-геологические, инженерно-гидрометеорологические и инженерно-экологические изыскания) | | | | |
| Абиотические | Литосфера и ее компоненты (грунты, донные отложения, подземные воды, подземные газы, ландшафты, геологические процессы, радиационная обстановка, радоноопасность, вибрация, электромагнитные излучения) | 82 | 21 | 10 | 163 | |
| | Педосфера и ее компоненты (почвы, плодородный слой, гумус) | 35 | 7 | 8 | 83 | |
| | Атмосфера и ее компоненты (воздух, электромагнитные излучения, шумы, инфра- и ультразвук, гидрометеорологические процессы) | 19 | 9 | 9 | 46 | |
| | Поверхностная гидросфера и ее компоненты (поверхностные воды суши, морские воды, гидрометеорологические процессы) | 17 | 14 | 10 | 52 | |
| Биотическая | Биосфера | растительный и животный мир (растения, мхи, лишайники, животные, птицы, рыбы, микроорганизмы, бактериопланктон, фитопланктон, зоопланктон, ихтиопланктон, макробентос) | 22 | 13 | 5 | 41 |
| | | социум (санитарно-эпидемиологическая и медико-биологическая обстановка, заболевания населения, социально-экономические условия) | 18 | 6 | 6 | 21 |
| Все абиотические и биотическая компоненты экосистем | | 193 | 70 | 48 | 406 | |

Примечания. Пункты СП, в которых одновременно регламентировано изучение нескольких компонент экосистем, учитывались несколько раз.

Завершая рассмотрение вопроса, поставленного в названии настоящей работы, подчеркну, что роль геологических показателей в сводах правил систематически возрастала и стала очень существенной (см. табл. 3). Сами нормативные документы систематически совершенствовались. В СП 502.1325800.2021 [3] включен целый ряд новых позиций: о выполнении инженерно-экологических изысканий в благоприятных условиях; о возможности использования результатов инженерно-экологических изысканий прошлых лет; списки нормативных документов (законы, ГОСТы, СанПины и др.), а в ряде случаев – и таблицы с величинами оценочных показателей изучаемых характеристик; использование понятия «экосистема»; *введение в состав инженерно-экологических изысканий в качестве обязательного элемента изучение опасных природных и природно-антропогенных процессов*; исследование и оценка загрязнения грунтов; изучение воздействия опасных природных и природно-антропогенных процессов на окружающую среду. Среди этих процессов – большая группа эндогенных, экзогенных и антропогенно обусловленных геологических процессов.

Литература

1. *Свод правил СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция СНиП 22-01-55. М.: Стандартинформ, 2018.*
2. *Свод правил СП 11-102-97. Инженерно-экологические изыскания для строительства. М.: Госстрой России, 1997.*
3. *Свод правил СП 502.1325800.2021. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М.: Минстрой России, 2021.*
4. *Свод правил СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. М.: Стандартинформ, 2017.*
5. *Строительные нормы и правила СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Госстрой России. 1997.*
6. *Трофимов В.Т. Эколого-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 4. С. 48–52.*
7. *Трофимов В.Т. Зилинг Д.Г. Экологическая геология. М.: Геоинформмарк, 2002.*
8. *Трофимов В.Т. Экологическая геология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2024.*

МАССИВЫ КАРБОНАТНЫХ БИОЛИТОВ КАК ЖИЗНЕОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ РЕСУРС ЭКОЛОГО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ ИЗВЕСТНЯКОВ КРЫМА И ПИСЧЕГО МЕЛА ЦЕНТРАЛЬНЫХ РАЙОНОВ РУССКОЙ ПЛИТЫ)

М.А. Харькина, Т.В. Андреева

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1
E-mail: kharkina@mail.ru, andreeva.msu@yandex.ru

Эколого-геологические системы (ЭГС) – это определенный объем литосферы как геологический компонент природной среды с находящейся в ней и на ней биотой, включая человека и социум [6]. Живые организмы живут и функционируют в литосфере или непосредственно на ее поверхности, сложенной биолитами. Под карбонатными биолитами имеются грунты, состоящие в основном из остатков вымерших животных и продуктов их жизнедеятельности. Состав и свойства биолитов, как литотопа ЭГС, во многом определяют условия жизни современных организмов.

Часто по минеральному составу биолиты представляют собой преимущественно карбонат кальция. Так, состав писчего мела верхнего отдела меловой системы туронского яруса района г. Курчатов (Курская обл.), определенный с помощью рентгеновского дифрактометра ULTIMA-IV (приобретенном за счет средств Программы развития Московского университета), состоит преимущественно из кальцита (до 99,6%), а песчаные и глинистые его разновидности содержат не только кальцит (38,3%), но и кварц (51,9%) и иллит (7,45 %). Содержание других минералов (микроклина, альбита, смектита, сидерита, пирита) отмечается не во всех исследованных образцах и составляет первые проценты [5].

При выходе известняков на поверхность высокое содержание карбоната кальция обуславливает развитие на них кальцефитной растительности. На территории второй гряды Крымских гор выделено десять видов кальцефитов [1], три относятся к *облигатным* (обязательным) формам, семь – к *факультативным* (необязательным). Большинство облигатных кальцефитов приурочено к органогенно-обломочным отложениям – известнякам, а большинство факультативных форм кальцефитов связано с осадочными отложениями глинисто-карбонатного состава (мергелями). К облигатным видам относятся полынь кавказская (*Artemisia alpina* Pall. ex Willd.) – стелющийся полукустарничек, ламира ежеголовая (*Lamyra echinocephala* Willd.) – полукустарничек, очиток испанский (*Sedum hispanicum* L.) – многолетнее травянистое растение. К факультативным видам, произрастающим на карбонатных массивах, относятся венечник ветвистый (*Anthericum ramosum* L.) – поликарпическая трава, молочай хрящеватый (*Euphorbia glareosa* Pall. ex M. Bieb.) – поликарпическая трава, герань рассеченная (*Geranium dissectum* L.) – однолетник, лен австрийский (*Linum austriacum* L.) – поликарпическая трава, люцерна серповидная (*Medicago falcata* L.) – поликарпическая трава, подорожник ланцетовидный (*Plantago lanceolata*) – поликарпическая трава, дубровник обыкновенный (*Teucrium chamaedrys* L.) – полукустарничек.

Среди растений на массивах меловых грунтов также распространены кальцефитно-степные сообщества. Так на склонах долины р. Дон (Воронежская обл.), на слабо затронутом почвообразованием аллювии меловых пород распространены степные сообщества, в состав которых кроме обязательного компонента – осоки низкой (*Carex humilis*) – входят проломник мохнатый (*Androsace villosa*), бурачок ленский (*Allisum lenense*), полынь шелковистая (*Artemisia sericea*), шиверекия подольская (*Schivereckia podolica*) и другие [2].

Физико-механические свойства биолитов (табл. 1) в значительной степени определяют условия существования живых организмов. Так, высокая пористость большинства биолитов (писчий мел, мшанковые, нуммулитовые известняки, известняки-ракушечники) определяет низкую теплопроводность (до 0,3-0,8 Вт/м·К) и в сочетании с относительно высокой прочностью позволяет использовать их как строительный камень для жилья человека. Относительно высокая пористость обеспечивает наличие укрытий для членистоногих, использующих в качестве жилищ поры и трещины

в массивах. Исключение составляют рифовые известняки, имеющие относительно низкую пористость (1,2-1,5%), определяющую недоступность проникновения членистоногих вглубь массива.

Таблица 1

| Характеристики биолитов, влияющие на условия расселения биоты | | | | | | |
|--|----------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Характеристики биолитов | Регион | Русская плита (Курская обл.) | Горный Крым | | | |
| | Состав | Песчий мел | Известняки | | | |
| | Вид, возраст | Мел чистый, K _{2t} | Мшанковые P _{1d-sl} | Нуммулитовые, P _{2i2-l} | Ракушечник N _{1s} | Рифовые J3km, K _{1v-h} |
| Плотность, г/см ³ | | 1,76-2,15 | 1,76 | 1,81-2,47 | 2,10 | |
| Пористость, % | | 28-52 | 43 | 11-44 | 30 | 1,2-1,5 |
| Прочность на сжатие, МПа, в состоянии | воздушно-сухом | 0,3-1,1 | 7,6 | 9,8-40,1 | 14,4-16,7 | |
| | водонасыщенном | | 5,1 | 7,0-34,0 | | |
| Условия расселения биоты | | Благоприятные | | | | Неблагоприятные |

Экзогенные геологические процессы, развитые в массивах биолитов, определяют видовой состав растительности. Речь, прежде всего, идет о карстовом процессе. Так, на плато Ай-Петри, сложенном рифовыми известняками, в днищах крупных карстовых воронок, диаметр которых достигает 200-300 и более метров, растительность по составу и структуре контрастирует с окружающим фитоценозами [3]. Склоны воронки покрыты лесом из типичных для пояса листопадных древесных пород южного макросклона Горного Крыма, однако в днище воронки древесная растительность практически не проникает. Здесь преобладает травянистая луговая растительность. Основной причиной безлесья днища воронки является близкий уровень грунтовых вод, что создает неблагоприятные условия для роста деревьев, формирующих глубокую корневую систему, и способствует развитию луговой растительности, корневищные элементы которой более конкурентноспособны по сравнению с таковыми древесно-кустарниковых видов растений.

Геофизические поля, существующие в верхней части массивов биолитов, способствуют расселению беспозвоночных. Речь идет о специфике распределения температур в массиве и освещенности его поверхности. Обитаемые высокопористые горизонты массивов большинства биолитов в приповерхностной части массива (например, в Белгородской области) характеризуются более низкой температурой в летние месяцы и незначительной разницей дневных и ночных температур. Суточные вариации температуры на поверхности на 4-20 °С превышают таковые внутри массива на глубине 10-30 см, что способствует созданию благоприятных условий для жизни [4].

Обладая высоким альбедо, особенно песчий мел и нуммулитовые известняки, способны обеспечивать дополнительный по отношению к другим источникам тепла нагрев живых тел, находящихся на его поверхности, что особенно сказывается на членистоногих, если они оказываются на «светлом» фоне. Даже кратковременный их выход на открытую поверхность массивов грозит быстрым перегревом и потерей влаги. Поэтому выходы биолитов на поверхность обладают различной пригодностью для расселения живых организмов, в том числе членистоногих и других беспозвоночных. Субвертикальные обнажения песчого мела в Белгородской обл. с протяженными узкими трещинами, в которые проникают корни растений и накапливается много органики, заселяются детритоядными мокрицами, хищными многоножками и пауками-засадниками из семейства Clubionidae и Gnaphosidae, на поверхности обнажений обитают пауки из семейства Salticidae. В основании обнажений, где скапливается щебень и имеются обширные полости, в которые проникает дневной свет, попадает крупнодисперсная органика и поддерживается высокий уровень влажности, обитают мезо- и гигрофильные детритоядные членистоногие (мокрицы Oniscidae, кивсяки Blaniulidae, Julidae, чернотелки Tenebrionidae и др.), днем находятся сумеречные и избегающие перегрева дневные хищники (например, жуки из семейств Carabidae Staphylinidae,

Histeridae, Lycosidae, Gnaphosidae, Lithobiidae), а также пауки из семейств Theridiidae, Agelenidae, Linyphiidae [4].

Таким образом, характеристики состава и свойств, экзогенные геологические процессы и геофизические поля массивов биолитов во многом определяют жизнеспособность эколого-геологических систем. Карбонатный состав массивов биолитов предопределяет распространение кальцефитной растительности. Такие важнейшие характеристики биолитов как низкая плотность, высокая пористость, относительно низкая прочность, особенно при увлажнении способствует расселению членистоногих, использующих в качестве укрытий от высокой освещенности и перепада дневных и ночных температур на поверхности низкую теплопроводность пористых массивов биолитов. Существенное влияние на видовой состав поверхностных фитоценозов оказывает карстовый процесс. В местах близкого к поверхности расположения уровня грунтовых вод в днищах карстовых воронок преобладает травянистая растительность в связи с невозможностью развития глубокой корневой системы у древесной растительности.

Литература

1. Абдыкадырова С.Б., Королёв В.А. Кальцефиты в эколого-геологических системах Горного Крыма // V Межд. научно-практич. конф. «Актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных государств», Гомель, 28-29 ноября 2019 (Беларусь). Т. 2. Гомель, Гомельский гос. ун-т, 2019, с. 7–9.
2. Виноградов Н.П., Голицын С.В. «Сниженные Альпы» и тимьянники Среднерусской возвышенности // Ботанический журнал. 1954. Т. 39, №3, с. 423–430.
3. Никифоров А.Р., Костенко И.В. Почва и растительность карстовой воронки западного отрога плато Ай-Петри в Горном Крыму // Экосистемы. 2019. Вып. 49, с. 54–60.
4. Присный А.В. Адаптация членистоногих к обитанию на меловых отложениях / Приспособление организмов к действию экстремальных экологических факторов. Матер. VII Международной научно-практ. экологической конф., г.Белгород, 5-6 ноября 2002 г. Белгород: Изд-во БелГУ, 2002, с. 69-75.
5. Харькина М.А., Андреева Т.В. Эколого-геологические системы массивов меловых грунтов центральных районов Русской плиты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. Т. 63, № 3, с. 65–72.
6. Экологические функции литосферы / В.Т. Трофимов, Д.Г. Зилинг, Т.А. Барабошкина и др./ Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2000. 432 с.

СЕКЦИЯ 5. ВОПРОСЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СООРУЖЕНИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С МАССИВАМИ ГРУНТОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА НА ФЕДЕРАЛЬНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ В КРИОЛИТОЗОНЕ

С.В. Алёхин¹, А.В. Андреев², Н.В. Быстров¹, П.В. Кирин³

¹ Ассоциация «Р.О.С.АСФАЛТ», 121357, г. Москва, ул. Верейская, д. 29, стр. 33

² ФКУ «Енисей», 660017, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Ленина, дом 111, 7 этаж

³ РУТ (МИИТ), АДХ, г. Москва, улица Люблинская, д. 88, стр. 1

E-mail: info@rosasflt.org, enisey@post.kts.ru, roadacadem@miit.ru

За последнее время возросло внимание, уделяемое проблемам, связанным со строительством и эксплуатацией сооружений, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых (вечномерзлых) грунтов (далее – ММГ) в криолитозоне. Это обусловлено двумя главными факторами: площадью криолитозоны (более 65% территории Российской Федерации находится в зоне вечной мерзлоты) и изменением климата, в частности, увеличением среднегодовой температуры воздуха [7].

ММГ сформировались в результате комплекса исторических процессов, которые характеризовались продолжительными периодами устойчивых отрицательных температур в нижних слоях атмосферы на границе с литосферой. В связи с неоднородностью грунтов, особенностями рельефа, характеристиками гидрогеологических условий местности, географическим положением и другими факторами, такими, как криогенное строение, характер распространения, глубина залегания, температурный режим ММГ, имеют широкий диапазон значений и требуют глубокого и трудоемкого изучения.

Увеличение среднегодовой температуры воздуха зачастую приводит к росту глубины деятельного слоя, а также активизирует процессы деградации вечной мерзлоты, напрямую влияющие на эксплуатационное состояние объектов капитального строительства, в частности, автомобильных дорог. Оттаявший грунт, по сути, становится слабым основанием, что снижает несущую способность автомобильных дорог. Проявляясь неравномерно, геокриологические процессы приводят к неоднородному напряженно-деформированному состоянию покрытий. Так уже сейчас фиксируется значительное количество деформаций дорожной одежды, откосов и всей дорожной конструкции в целом [8].

При этом необходимо помнить, что расположение автомобильной дороги в зоне вечной мерзлоты не влияет на установленные Правительством РФ [4] нормативные межремонтные сроки службы дорожной одежды: 12 лет для верхних слоев и 24 года для всей конструкции. Поддержание линейного сооружения в нормативном состоянии при протекании геокриологических процессов в границах полосы отвода требует проведения незапланированных мероприятий по восстановлению их транспортно-эксплуатационного состояния, что приводит к значительному росту затрат на содержание такой автомобильной дороги.

С целью получения актуальной и достоверной информации о текущем состоянии сооружения для своевременного обнаружения начавшихся геокриологических процессов, целесообразны организация и проведение мониторинга. Необходимость и актуальность его организации закреплена Правительством Российской Федерации [5].

Федеральным дорожным агентством проводится системная работа на основе утвержденного Плана мероприятий, включающего в себя программу научных исследований [8]. В рамках проводимых НИОКР в кратчайшие сроки коллективом экспертов, включающим сотрудников нескольких институтов РАН, был разработан отраслевой методический документ 218.11.007-2023 (далее - ОДМ) [3], содержащий рекомендации по организации мониторинга для оценки инженерно-геокриологических условий, метеорологических условий и напряженно-деформированного состояния дорожных кон-

струкций. В методическом документе даны предложения по оснащению, устройству и организации работы стационарных мониторинговых постов на действующей сети автомобильных дорог общего пользования для ведения инженерно-геокриологического мониторинга в границах полосы отвода автомобильных дорог в криолитозоне.

Руководствуясь положениями разработанного ОДМ, к концу 2024 года введено в действие и эксплуатируется 7 мониторинговых постов (рисунок 1). Три поста установлены на федеральной автомобильной дороге Р-504 «Колыма», два – на А-331 «Виллой», по одному – на А-360 «Лена» и Р-297 «Амур» (таблица 1). На каждом из них данные фиксируются автоматически и, в зависимости от условий расположения поста, передаются дистанционно или хранятся и снимаются на месте с определенной периодичностью.

Собираемые данные с постов мониторинга являются основой для разработки не только мероприятий по эксплуатации и ремонту автомобильных дорог, но фундаментом и доказательной базой для разработки нормативных документов, так как имеют большое значение, ввиду специфики условий работы автомобильной дороги в криолитозоне.

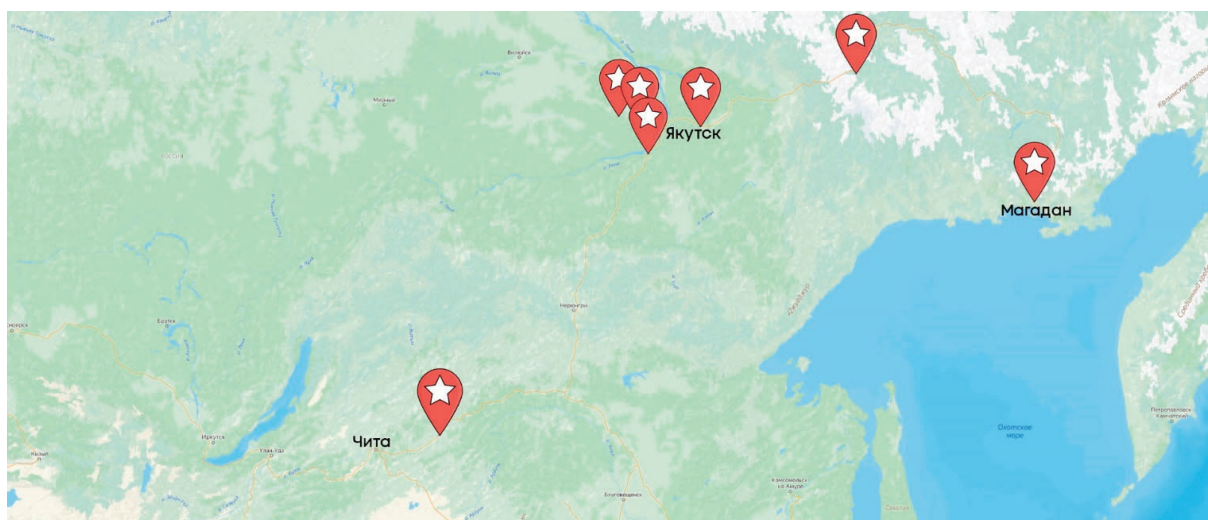


Рис. 1. Расположение постов мониторинга

| <i>Таблица 1</i> | | | |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------|
| Перечень постов мониторинга | | | |
| Наименование ФКУ | Субъект | Автомобильная дорога | Участок |
| ФКУ Упрдор «Лена» | Республика Саха (Якутия) | А-360 «Лена» Невер – Якутск | км 1049+950 |
| ФКУ ДСД «Дальний Восток» | Магаданская область | Р-504 «Колыма» Якутск – Магадан | км 1959 |
| ФКУ Упрдор «Виллой» | Иркутская область | А-331 «Виллой» Тулун – Якутск | км 75+750 |
| | Иркутская область | А-331 «Виллой» Тулун – Якутск | км 145+000 |
| | Республика Саха (Якутия) | Р-504 «Колыма» Якутск – Магадан | км 147+830 |
| | Республика Саха (Якутия) | Р-504 «Колыма» Якутск – Магадан | км 727+750 |
| ФКУ Упрдор «Забайкалье» | Забайкальский край | Р-297 «Амур» Чита – Хабаровск | км 288 |

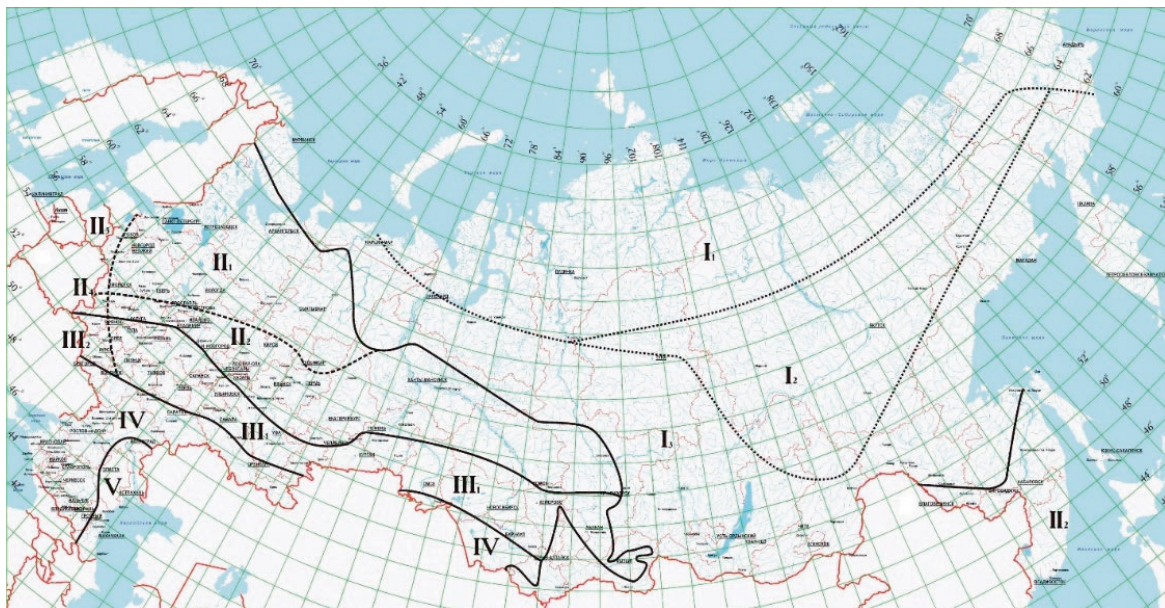


Рис. 2. Схема дорожно-климатических зон и подзон [8]

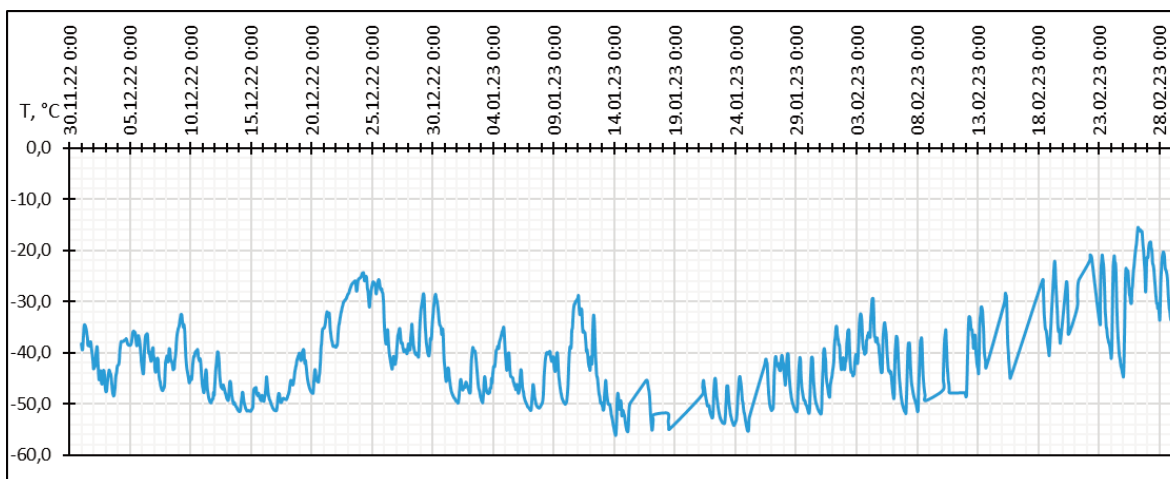


Рис. 3. График температуры воздуха в зимний период 2022/2023 гг.

Согласно ОДМ в рамках организации и оборудования постов геокриологического мониторинга на выбранных ключевых участках на каждом посту были пробурены 5 инженерно-геологических скважин колонковым методом глубиной не менее 16 м с описанием и отбором kernового материала: с обеих сторон от оси автомобильной дороги в границах полосы отвода. После окончания буровых работ скважины оборудовались термометрическими трубками на всю глубину [1].

Для получения локальных климатических данных на участках комплексных постов наблюдения установлены автоматизированные метеостанции с возможностью измерений следующих метеорологических параметров: атмосферное давление, температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра, температура на поверхности почвы, количество атмосферных осадков, количество солнечной радиации, толщина снежного покрова. В комплекс данных о геокриологическом состоянии участка в частности входят такие параметры: температура грунтов до глубины 20 м, их влажность и еще один показатель, на котором остановимся отдельно.

Таким параметром, фиксируемым на постах, является плотность тепловых потоков в конструкции дорожной одежды. Данный показатель фиксируется под дорожным покрытием на глубине 15 см и в естественном ландшафте на такой же глубине. В течение последних десятилетий работы по изучению тепловых потоков в дорожной одежде практически не проводились. В части автомобильных дорог, в середине 1980-х проводились исследования водно-теплового режима дорожных одежд [6] в II дорожно-климатической зоне (далее – ДКЗ) (рисунок 2). В статье Остроумова В.Е. и др. [9]

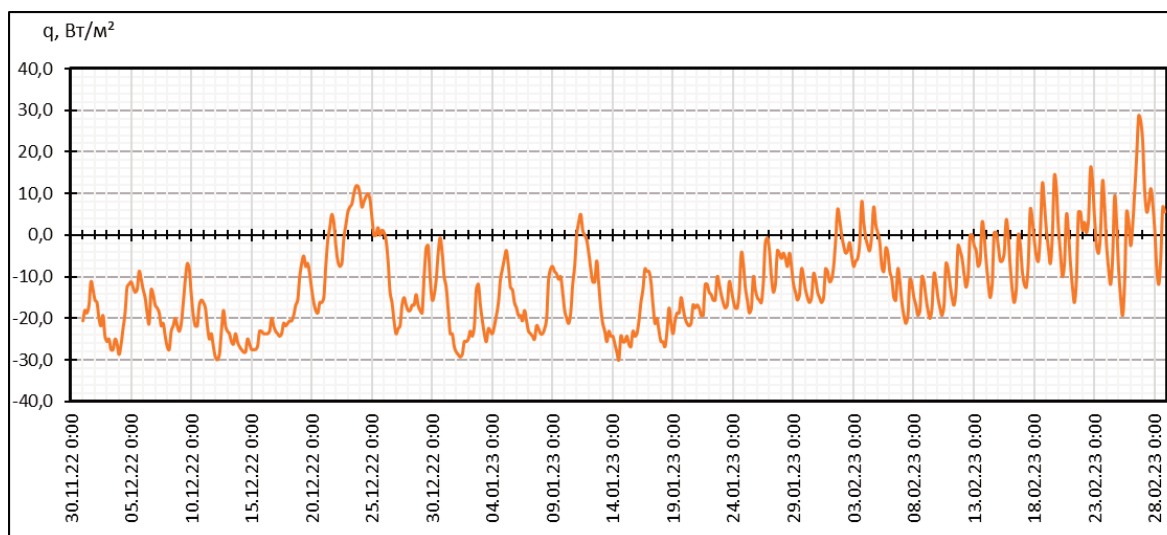


Рис. 4. График теплового потока в зимний период 2022/2023 гг.

приведены результаты системных наблюдений за тепловыми потоками в криометаморфической почве и примеры использования полученных данных для решения инженерных задач, но аспекты автомобильных дорог эта работа не затрагивает.

Можно констатировать, что постоянное наблюдение за тепловыми потоками в дорожных одеждах автомобильных дорог в I ДКЗ организованы, практически впервые.

На рисунках 3-4 приведены данные о температуре воздуха и значении теплового потока в дорожной одежде на посту, расположенном на км 147+830 Р-504 «Колыма» близ села Маралайы республики Саха (Якутия).

Следует отметить, что измеренные на данном посту величины тепловых потоков, существенно превышают значения тепловых потоков в дорожной одежде в Центральной полосе России (II ДКЗ). Так, в феврале месяце в Московской области этот показатель зафиксирован на уровне 5,35 Вт/м² [6], а на посту Маралайы величина теплового потока в феврале 2023 года достигает 28,7 Вт/м².

Это свидетельствует о существенных различиях в температурных режимах работы дорожных конструкций как в I ДКЗ, так и в других зонах. Более интенсивная передача тепла в дорожных конструкциях способствует увеличению температурных напряжений.

Учитывая тот факт, что ГОСТ Р 71404, устанавливающий правила проектирования нежестких дорожных одежд [2], не распространяется на I ДКЗ, данные, получаемые на постах наблюдения, дадут возможность разработать подходы к учету особенностей при расчете нежестких дорожных одежд в криолитозоне.

Продолжение исследований и расширение количества мониторинговых постов, а также, вероятно, и контролируемых на них параметров, позволит повысить точность проектирования вновь строящихся дорожных объектов, а также разрабатывать и реализовывать требуемые технические решения с целью обеспечения сохранности конструкций существующих автомобильных дорог, расположенных в зоне распространения ММГ.

Литература

1. ГОСТ 25358-2020 «Грунты. Метод полевого определения температуры».
2. ГОСТ Р 71404-2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования».
3. ОДМ 218.11.007-2023 «Методические рекомендации по организации инженерно-геокриологического мониторинга и оборудованию инженерно-геокриологических мониторинговых стационарных постов в полосе отвода автомобильных дорог в криолитозоне» (издан на основании распоряжения Росавтодора от 22.02.2023 № 366-р).
4. Постановление Правительства от 30 мая 2017 г. №658 «О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения».

5. *Постановление Правительства РФ от 14 марта 2024 года № 300 «Об утверждении Положения о государственном экологическом мониторинге (государственном мониторинге окружающей среды)».*
6. *Проектирование нежестких дорожных одежд с теплоизоляционными слоями с учетом колебаний фронта промерзания. Быстров Н.В. Москва, 1984, 195 стр.*
7. *Распоряжение Правительства РФ от 11.03.2023 N 559-р «Об утверждении национального плана мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года».*
8. *Распоряжение Федерального дорожного агентства от 30.04.2021 № 1759-р «Об утверждении плана мероприятий («дорожная карта») по организации мониторинга состояния участков автомобильных дорог общего пользования федерального значения, проходящих по территории распространения многолетнемерзлых грунтов в пределах криолитозоны, в целях адаптации к изменениям климата».*
9. *Тепловые потоки в криометаморфической почве северной тайги и ее теплообеспеченность. Остроумов В.Е., Давыдова А.И., Давыдов С.П., Федоров-Давыдов Д.Г., Еремин И.И., Кропачев Д.Ю. [URL: https://omsketalon.ru/sites/default/files/fedorov_dovidov.pdf?ysclid=m5np0usnl0794862757] (дата обращения: 16.12.2024).*

РЕЗУЛЬТАТЫ ДОРОЖНО-КЛИМАТИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

И.А. Баширова¹, С.Н. Гиллих², В.Н. Ефименко¹, С.В. Ефименко¹,
В.С. Чурилин¹

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

² Департамент транспорта и дорожного хозяйства Ямало-Ненецкого автономного округа, 629008, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Зои Космодемьянской, 43
E-mail: izgolich@mail.ru, SNGillih@yanao.ru

Одним из пунктов Указа Президента РФ от 26.10.2020 г. №645 «О стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» [11] является развитие транспортной инфраструктуры Арктической зоны, для чего необходимо обеспечить качественное проектирование и строительство автомобильных дорог. Однако действующие нормы проектирования, например, СП 34.13330.2021 [15], не в полной мере учитывают особенности природно-климатических условий отдельных регионов страны, включая Арктическую зону, что провоцирует снижение эксплуатационной надёжности транспортных сооружений и вызывает значительные затраты на проведение восстановительных работ. Для обеспечения надёжности проектирования и строительства автомобильных дорог на территории Арктической зоны, в частности Ямало-Ненецкого автономного округа, следует учитывать особенности природно-климатических условий региона.

Специалисты кафедры «Автомобильные дороги» ТГАСУ осуществляют исследования, направленные на уточнение дорожно-климатического районирования территории Ямало-Ненецкого автономного округа [3, 5, 12] по методологической схеме с применением таксономической системы «зона-подзона-район», включающей две стадии работ (см. рисунок 1) [7, 8, 13]. Выделение районов для отдельных регионов страны, в пределах которых однотипные дорожные конструкции можно охарактеризовать близкими значениями прочности и устойчивости, – главная задача уточнения дорожно-климатического районирования по данной схеме. Если площадь территории велика, то уточнение дислокации границ зон и выделение подзон и дорожных районов осуществляют в пределах границ административных образований, после этого производят «сшивку» границ дорожных районов на территориях других административных образований, примыкающих к тем, в пределах которых уже выполнены работы по учёту элементов геоконструкта [1, 6].

В работе [4] территория Западной Сибири была разделена на четыре дорожно-климатические зоны (см. рисунок 2). На основании анализа картографических материалов и работ по районированию территории Западной Сибири авторами работ [2, 4] уточнена дислокация границы I-II дорожно-климатических зон. Выявлено, что она проходит между параллелями с юга 56° с.ш. на север до 62° с.ш. через опорные пункты: Пионерный – Ханты-Мансийск – Нефтеюганск – Стрежевой – Белый Яр – Канск.

Согласно положениям [14] одними из основных признаков выделения подзон в условиях I дорожно-климатической зоны являются рельеф местности и характер распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Руководящим критерием при выделении *подзон* на территории Ямало-Ненецкого автономного округа принят рельеф местности, при выделении *районов* – мощность многолетнемерзлых пород (ММП) и их температура на поверхности. Перечисленные критерии оказывают существенное влияние на проектирование, строительство и эксплуатацию автомобильных дорог арктической зоны [9].

Рельеф Ямало-Ненецкого автономного округа в основном равнинный (см. рисунок 3) с высотами до 50 метров над уровнем моря, из-за чего для округа характерно множество озёр и болот различного типа. Холмистый рельеф определяется возвышенностью Мужинский Увал (290 м), а также тем, что южная граница округа проходит по возвышенности Сибирские Увалы с высотами от 130 до 250-285 метров. Горная часть округа (западная граница) проходит по вытянутому в субмеридиональном направлении на 400 км Полярному Уралу [10, 16]. Наличие многолетней мерзлоты –

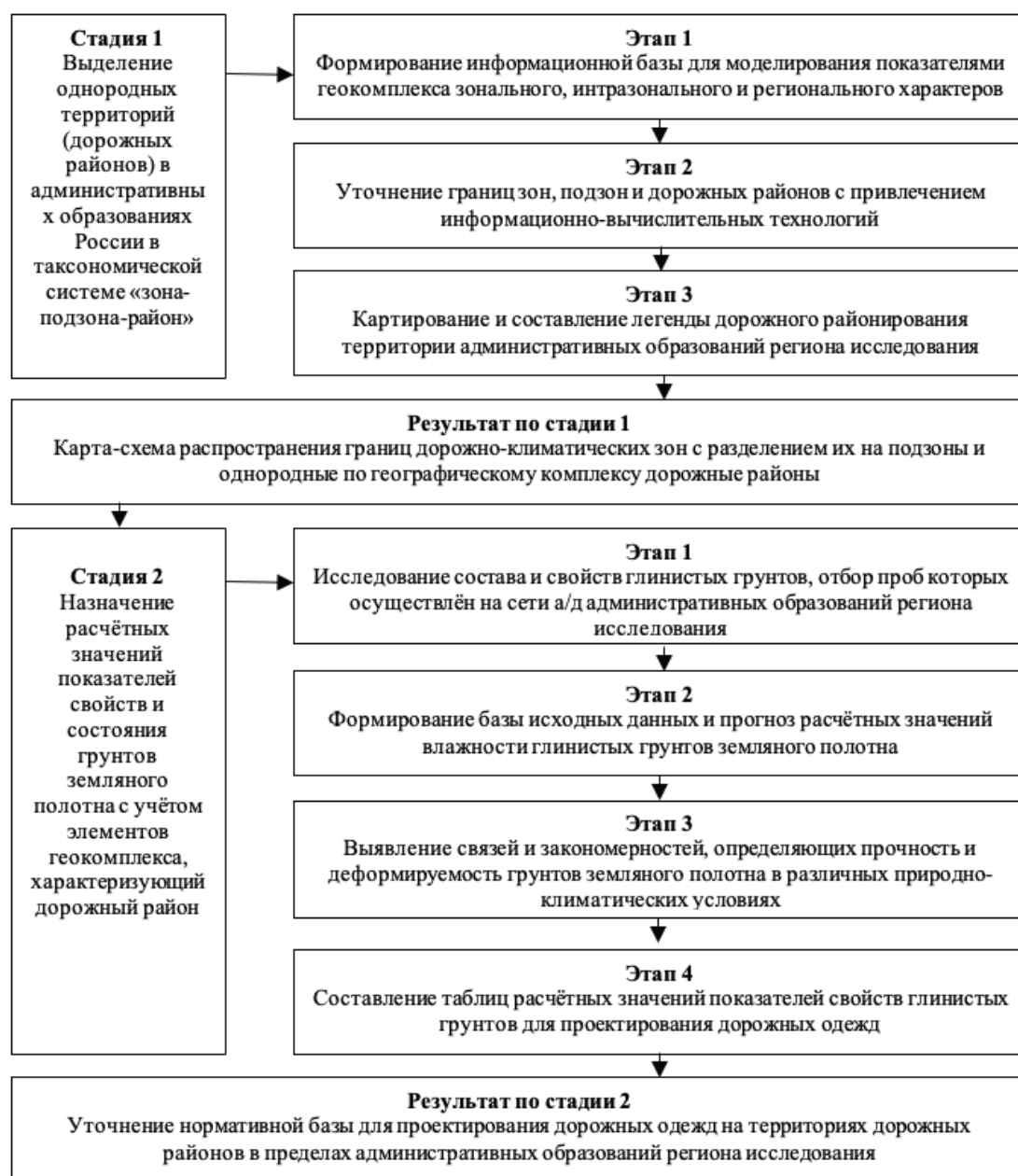


Рис. 1. Схема работ, направленных на обеспечение качества проектирования транспортных сооружений за счёт учёта природно-климатических условий отдельных территорий России (по С.В. Ефименко)

важная региональная особенность Ямало-Ненецкого автономного округа. По особенностям распространения многолетнемёрзлых пород (ММП) выделено 3 подзоны (см. рисунок 3).

Природные зоны на территории ЯНАО включают в себя ландшафтные зоны (подзоны): тундры (арктическая, типичная, южная); тайга (лесотундровая, севернотаёжная) и Уральские горы (см. рисунок 3). Растительность является одним из доминирующих признаков геокомплекса при выделении дорожно-климатических зон. Растительный покров тесно связан с такими элементами геокомплекса, как: увлажнённость территории, мм/градусо-сут; распространение многолетнемёрзлых грунтов (ММГ) и их температура на поверхности. Именно поэтому описание дорожно-климатических зон и подзон в СП 34.13330-2021 [15] базируется на увлажнённости территории и типе растительности.

В заключении отметим, работы по дорожно-климатическому районированию территории ЯНАО направлены на обеспечение качества проектирования и строительства автомобильных дорог региона. Для территории Ямало-Ненецкого автономного округа рекомендованы одна дорожно-климатическая зона (I), три подзоны (равнинный, холмистый и горный рельеф) и шесть дорожных районов (от 1 до 3 в зависимости от зоны и подзоны) (см. рисунок 4). Следующий

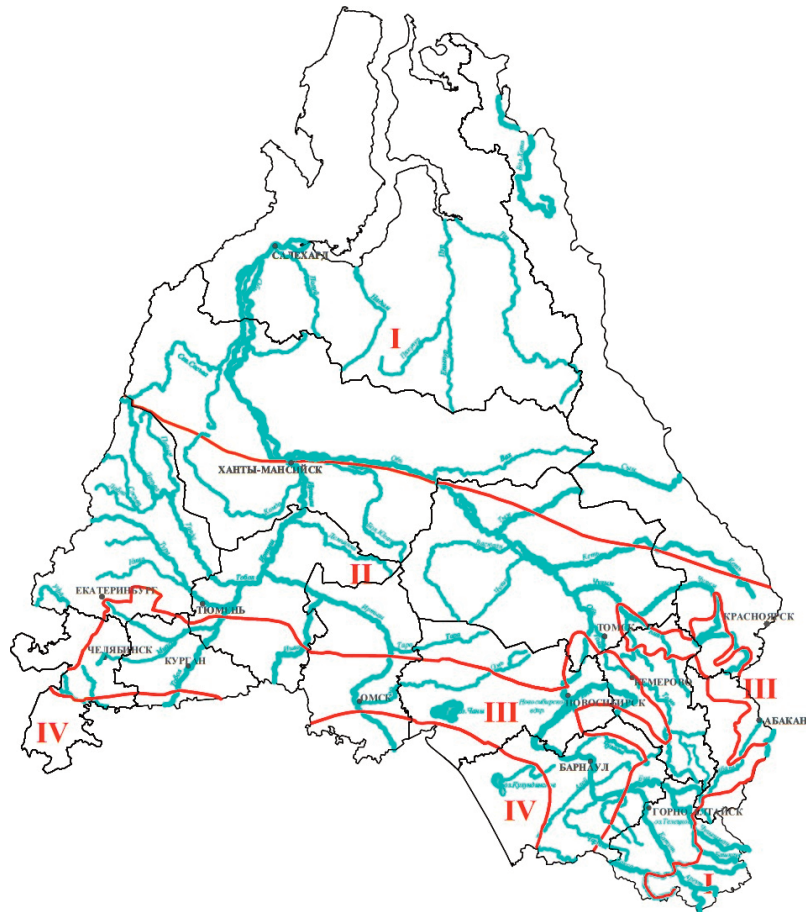


Рис. 2. Схема дорожно-климатического районирования территории Западной Сибири (по С.В. Ефименко [4])

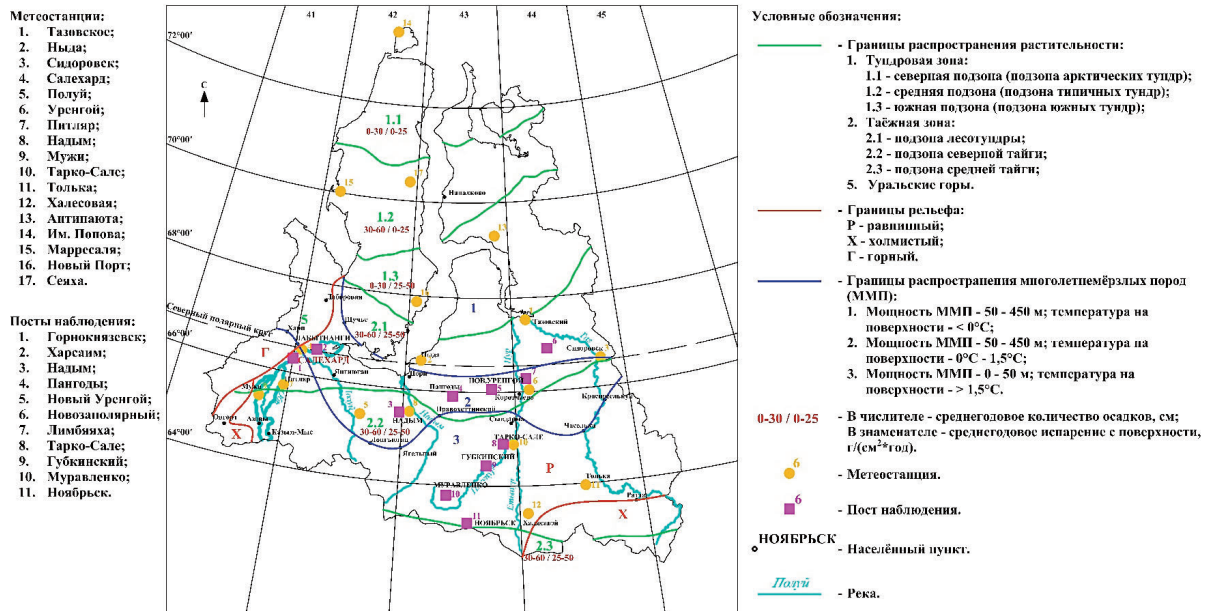


Рис. 3. Карта ЯНО с зонированием территории по растительности, рельефу и распространению многолетнемерзлых пород

этап работы предполагает назначение расчетных значений характеристик преобладающих грунтов земляного полотна на территории выделенных при дорожно-климатическом районировании таксонов.

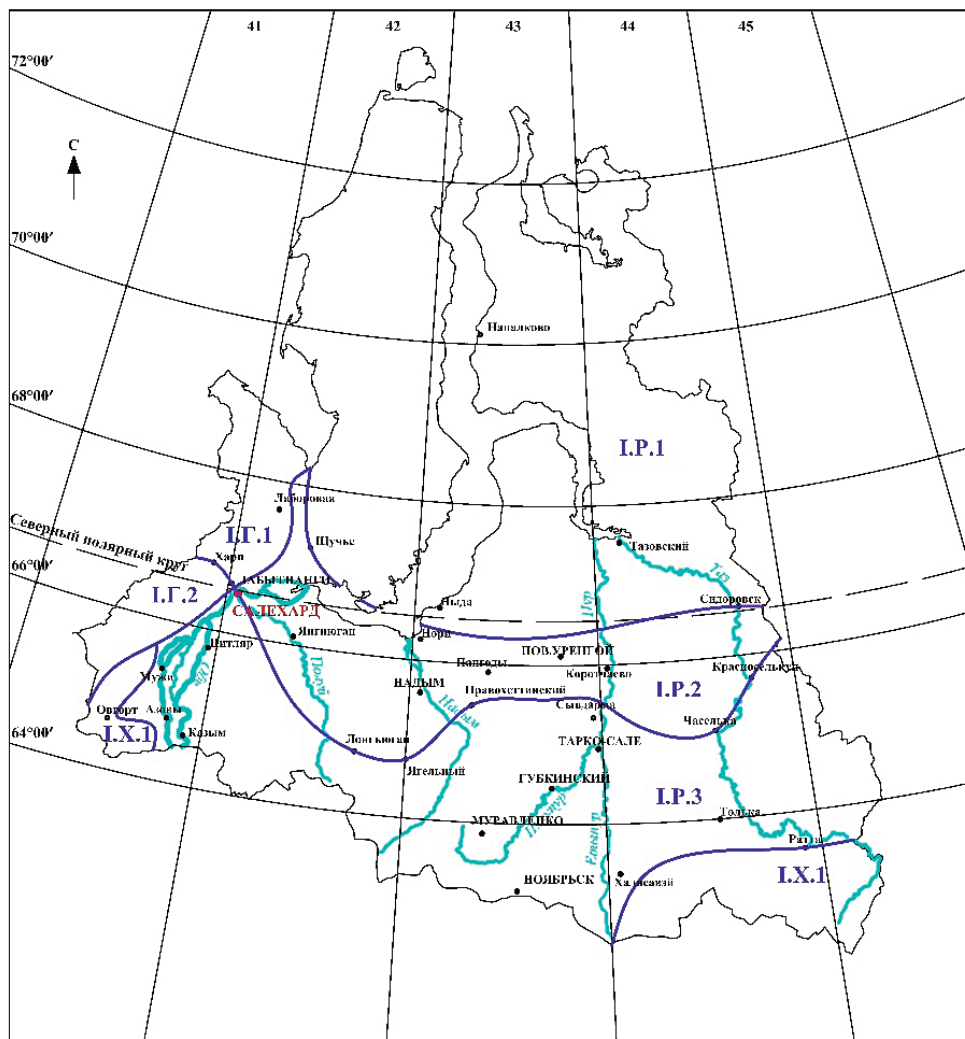


Рис. 4. Карта-схема дорожно-климатического районирования территории ЯНАО: I – дорожно-климатическая зона; P, X, Г – подзоны по типам рельефа (равнинный, холмистый, горный); 1-3 – номера дорожных районов

Литература

1. Афиногенов О.П. Совершенствование методов проектирования автомобильных дорог на основе дифференциации районирования [Текст]: монография. / О.П. Афиногенов, С.В. Ефименко, А.О. Афиногенов. – Кемерово: ООО «Офсет», 2015. – 364 с.
2. Бадина М.В. К обоснованию территориального распространения границы I–II дорожно-климатических зон в западносибирском регионе. / М.В. Бадина, В.Н. Ефименко, С.В. Ефименко // Вестник Том. гос. архит.-строит. ун-та. – 2013. – № 4 (41). – С. 295–303.
3. Ефименко В. Н. Особенности формирования информационного банка данных для уточнения границ дорожно-климатических подзон на территории ЯНАО / В. Н. Ефименко, С. В. Ефименко, И. А. Баширова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – Т. 24, № 6. – С. 150-159.
4. Ефименко С.В. Дорожное районирование территории Западной Сибири [Текст]: монография / С.В. Ефименко, М.В. Бадина. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. Ун-та, 2014. – 244 с. + 10 л. вкл. + 2 л. приложение.
5. Ефименко С. В., Елисеенко М. М. К уточнению схемы дорожно-климатического районирования территории Ямало-Ненецкого автономного округа // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 1(86). С. 94–103.
6. Ефименко, С.В. Методические аспекты регионального уточнения простираения линий границ дорожно-климатических зон. / С.В. Ефименко, Д.Н. Черепанов // Вестник МГСУ. – 2013. – №6. – С. 214 – 222.

7. Ефименко С.В. Учёт особенностей распространения геокомплексов при территориальной организации дорожно-климатического районирования / С.В. Ефименко, В.Н. Ефименко, М.В. Бадина, А.О. Афиногенов // Сборник ФГУП «РОСДОРНИИ». Дороги и мосты. – М., 2014. – №31. – С. 42 – 52.
8. Ефименко С.В. Учёт территориальной однородности географических комплексов при проектировании автомобильных дорог / С.В. Ефименко // Вестник ТГАСУ. – Томск, 2015. – №3(50). – С. 226 – 236.
9. Земляное полотно автомобильных дорог в северных условиях. / Под редакцией А.А. Малышев. – М.: Транспорт, 1974. – 279 с.
10. Научное издательство. Большая Российская энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <https://old.bigenc.ru/> (дата обращения: 08.11.2024).
11. О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года: указ Президента РФ от 26.10.2022 г. № 645 // КонсультантПлюс – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_366065/ (дата обращения: 10.09.2024).
12. Сиволап В. Е. Полевые и лабораторные исследования грунтов земляного полотна автомобильных дорог ЯНАО / В. Е. Сиволап // Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных трудов XIX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 26–29 апреля 2022 года. Том 6. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 66-68.
13. Сиденко В.М. Автомобильные дороги (Совершенствование методов проектирования и строительства). / В.М. Сиденко, О.Т. Батраков, М.И. Волков и др. – Киев: Будивельник, 1973. – 278 с.
14. СП 313.1325800.2017 Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. – М.: Стандартинформ, 2018. – 77 с.
15. СП 34.13330.2021. Автомобильные дороги. / Минстрой России. – М.: 2021. – 94 с.
16. Энциклопедия Сибири [Электронный ресурс]: URL: <https://encyclopediaofsiberia.tilda.ws/main> (дата обращения: 08.11.2024)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ЛАНДШАФТНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОМ РАЙОНИРОВАНИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В КРИОЛИТОЗОНЕ

**А.С. Викторов, Т.В. Орлов, В.Н. Капралова, М.В. Архипова, В.В. Бондарь,
Т.В. Гоников, А.В. Зверев, Д.О. Сергеев, А.Н. Хименков, А.П. Кулаков**

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2
E-mail: direct@geoenv.ru

Целью исследования является предложение методического подхода к созданию среднemasштабного ландшафтно-геокриологического районирования применительно к эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне. Актуальность работы связана как с наличием значительного числа негативных геокриологических процессов, так и с необходимостью экспресс-обследования больших площадей для оценки опасностей и планирования мониторинговой сети.

Исследование базируется на анализе и обобщении опыта работ по ландшафтно-геокриологическому районированию полосы автодороги «Чита-Хабаровск», выполненному коллективами «Лаборатории дистанционного мониторинга геологической среды» и «Лаборатории геокриологии» Института геоэкологии РАН им. Е.М.Сергеева.

Анализ показывает, что в решении поставленной задачи должны реализовываться следующие основные этапы:

- создание предварительной схемы дешифрирования ландшафтных и геокриологических условий и процессов зоны автодороги;
- выделение существующих процессов и изменений геокриологических условий по материалам дистанционных съемок в полосе, непосредственно прилегающей к исследуемой автодороге;
- разработка схемы ландшафтно-геокриологического районирования зоны автодороги;
- комплексный анализ ландшафтных и геокриологических условий и оценка развития геокриологических процессов в зоне автодороги.

Комплекс материалов для выполнения обзорного геокриологического районирования должен включать следующие данные:

- материалы дистанционного зондирования;
- цифровые модели рельефа;
- фондовые картографические материалы;
- фондовые материалы инженерно-геологических и инженерно-геодезических изысканий;
- фондовые материалы по состоянию участков дорожного полотна на рассматриваемой части трассы.

Материалы дистанционного зондирования должны включать следующие типы съемки:

- разносезонные мультиспектральные космические снимки среднего разрешения 10-30 м/пикс. (каналы – красный, зеленый, синий, ближний и дальний инфракрасные);
- высокодетальные космические снимки с разрешением 0,5-0,7 м/пикс (например, Google Maps, Bing, Esri World и др.).

В качестве цифровой модели рельефа целесообразно использовать глобальную цифровую модель местности Soregnicus DEM с разрешением 30 м/пикс. а для зоны развития многолетнемерзлых пород севернее 60 град с.ш. - Arctic DEM.

Фондовые картографические материалы должны включать:

- карты четвертичных отложений (м-б 1:200 000);
- карты дочетвертичных отложений (м-б 1:200 000);
- геокриологические карты различных масштабов;
- геоботанические и ландшафтные карты различных масштабов.

В процессе дешифрирования в зоне автодороги необходимо выделять следующие элементы:

- участки однородные по геокриологическим условиям (как правило, отвечают ландшафтными местностям и сложным урочищам);

- скопления очагов развития негативных криогенных процессов (термокарст, подтопление и т.д.) и отдельные наиболее значимые очаги;

- признаки развития негативных криогенных процессов (полигональная трещиноватость грунтов, бугристость, четковидность русел и др.).

При дешифрировании съемок в полосе, непосредственно прилегающей к исследуемой автодороге, должны выделяться очаги существующих процессов и изменения геокриологических условий по материалам дистанционных съемок, такие, как очаги термокарста, подтопления, термоэрозии, наледеобразования, пучения, участки развития полигонально-жильных структур и др. (рис.1).

Дешифрирование проводится на основе ландшафтно-индикационных подходов и прямых дешифровочных признаков. Представляется сочетание ручного дешифрирования и автоматизированных процедур для отдельных элементов (болота, гари и др.).



Рис. 1. Пример отражения на космическом снимке подтопления автодороги и термокарста по полигонально-жильным структурам (разрешение снимка 0,5-1 м)

Разработка схемы ландшафтно-геокриологического районирования должна включать следующие основные элементы:

- сопоставление предварительной схемы дешифрирования ландшафтных и геокриологических условий зоны автодороги, а также непосредственно прилегающей полосы и фоновых картографических данных и данных изысканий;
- сопоставление предварительной схемы дешифрирования ландшафтных и геокриологических условий зоны автодороги с имеющимися данными о признаках деформации покрытия и земляного полотна.
- комплексный анализ факторов развития геокриологических процессов;
- корректировка картографического материала и построение актуальной схемы ландшафтно-геокриологического районирования.

Работы по оценке развития геокриологических процессов включали:

- разработку критериев оценки опасности геокриологических процессов в зоне автодороги и в непосредственно прилегающей полосе;
- собственно оценку опасности геокриологических процессов.

Разработка критериев оценки опасности геокриологических процессов в зоне автодороги базируется на учете следующих факторов:

- наличие проявлений геокриологических процессов;
- наличие факторов, способствующих развитию геокриологических процессов;

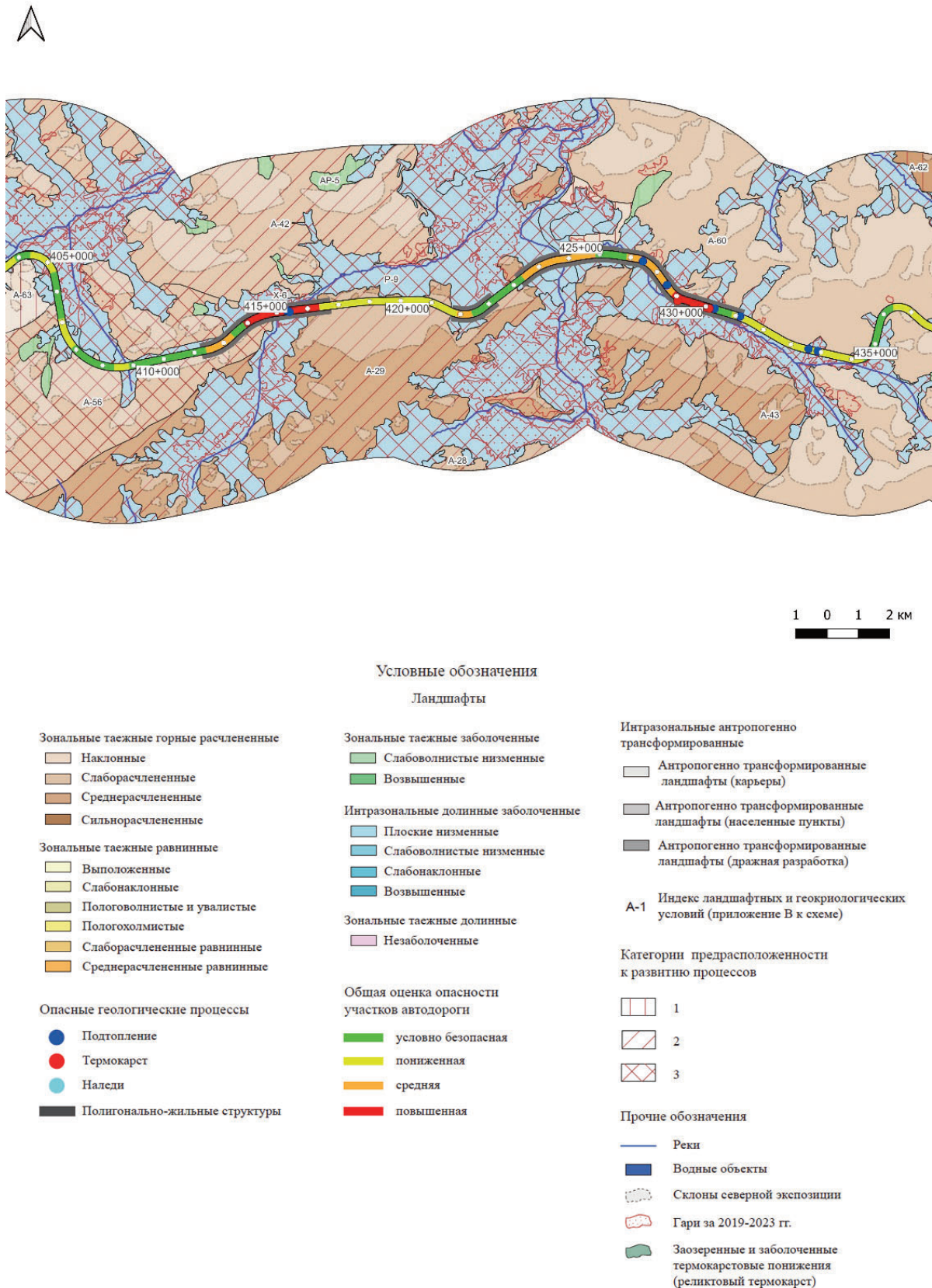


Рис. 2. Пример схемы ландшафтно-геокриологического районирования полосы автодороги Чита-Хабаровск в масштабе 1:100 000 (фрагмент) с условными обозначениями

- наличие условий, создающих предпосылки возникновения и развития геокриологических процессов.

Разработка критериев оценки опасности геокриологических процессов в непосредственно прилегающей полосе автодороги базируется на учете следующих факторов:

- количество встречающихся видов процессов;
- степень опасности процессов;
- плотность расположения очагов по каждому процессу;
- наличие факторов, способствующих развитию геокриологических процессов и (при наличии данных) динамичность очагов;
- наличие и масштабы развития признаков деформации дорожных одежд и земляного полотна.

В результате работ создается схема ландшафтно-геокриологического районирования полосы автодороги с выделением степени опасности участков в зоне автодороги (полоса шириной 10 км) и более детальным отражением степени опасности в полосе, непосредственно прилегающей к автодороге (шириной первые сотни метров). прилегающей к автодороге (шириной первые сотни метров).

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Материалы космических съемок позволяют проводить оценку ландшафтных и геокриологических условий в полосе автодорог в процессе эксплуатации.

Проведение ландшафтно-геокриологического районирования полосы автодороги на основании материалов космических съемок представляется целесообразным, так как позволяет за сравнительно короткие сроки на значительном протяжении дать прогнозную экспресс-оценку степени опасности развития негативных геокриологических процессов на различных участках автодороги.

Выполнение ландшафтно-геокриологического районирования требует использования комплекса разнородных данных, включая мультиспектральные космические снимки среднего разрешения, космические снимки высокого разрешения, цифровые модели местности и фоновые данные.

ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ «АМГА» В РЕСПУБЛИКЕ САХА (ЯКУТИЯ)

И.И. Сыромятников, А.В. Литовко, М.Н. Железняк

Институт мерзлотоведения СО РАН, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная 36
E-mail: igor@mpi.ysn.ru

Современные климатические изменения усиливают технологические риски состояния и эксплуатации инженерных сооружений, в том числе и автомобильных дорог. Особенно это отмечается в северных регионах, что связано с изменением инженерно-геокриологических условий (увеличение глубины сезонного протаивания, повышение температуры пород, развитие криогенных процессов и др.). Наиболее значительные изменения геологической среды и нарушения природно-технических систем наблюдаются в районах с близким залеганием к земной поверхности льдистых высокотемпературных грунтов, которые характерны для значительных участков территории прохождения автомобильных дорог в Восточной Сибири и Дальнем Востоке. При таких инженерно-геокриологических условиях даже незначительные изменения климата, на фоне антропогенных нарушений, способны вызвать необратимые изменения мерзлотно-ландшафтных условий и резкую интенсификацию развития негативных процессов на дорогах. Совместное влияние техногенного и климатического факторов уже привело и может привести в дальнейшем, в отдельных районах криолитозоны, к крупным деформациям дорог и созданию проблемных ситуаций в жизнеобеспечении.

Одним из путей минимизации проблемных ситуаций и обеспечении устойчивости инженерных сооружений являются обоснованные, с точки зрения инженерно-геологической изученности, проектные решения и создание системы контроля за состоянием грунтов в дорожной конструкции и в её основании [1, 5]. Проведение режимных (мониторинговых) исследований позволяет увеличить достоверность геокриологических прогнозов и при необходимости разработать превентивные мероприятия по обеспечению устойчивости инженерных конструкций.

Автомобильная дорога «Амга» относится к IV технической категории и принадлежит к автомобильным дорогам регионального значения с переходным типом покрытия. Автодорога соединяет поселки Нижний-Бестях – Амга Республики Саха (Якутия) и имеет протяженность около 175 км (рис.1).

Природные условия рассматриваемой территории относятся к группе среднетаежных провинций сплошного распространения многолетнемерзлых пород [3], и определяются её положением на юго-востоке Средней Сибири и охватывает среднее течение Лены, Лено-Вилюйское и Лено-Алданское междуречные пространства (Центральная Якутия).

Около 100 км автодороги «Амга» находится в пределах Тюнгилюнской и Абалахской террас р. Лены, которые характеризуются сложными инженерно-геокриологическими условиями.

Тюнгилюнская терраса представляет собой полого наклонную и слаборасчлененную поверхность (абс. выс. 145-180 м) и сложена полигенетическими отложениями ледового комплекса. На поверхности данной террасы развито большое количество озер различного происхождения. На севере и востоке происхождение озерных котловин преимущественно термокарстовое. Для них характерно широкое развитие булгунных озер. На юге в песчаных массивах озерные котловины имеют пологие склоны, четко выраженные днища, прибрежная их часть обычно заболочена. Они приурочены к местам разгрузки надмерзлотных и межмерзлотных вод. В аллювиальных отложениях Тюнгилюнской террасы вертикальная мощность повторно-жильных льдов составляет от 15-30 до 40-50 м. Ширина их колеблется от 2-3 до 4-6 м. В основном глубина залегания кровли ледяных жил изменяется от 1,4 до 2,2 м. Особенностью распространения и развития ледового комплекса тюнгилюнской террасы является постепенное его выклинивание к границе Бестяхской песчаной террасы р. Лены. Граница распространения жильных льдов проходит по извилистому контуру причленения пойменных супесей и суглинков тюнгилюнского уровня к бестяхским пескам [2].

Абалахская эрозионно-аккумулятивная терраса с абс. выс. 201-219 м имеет общий пологий уклон поверхности в направлении к тюнгилюнской террасе. Современная поверхность террасы

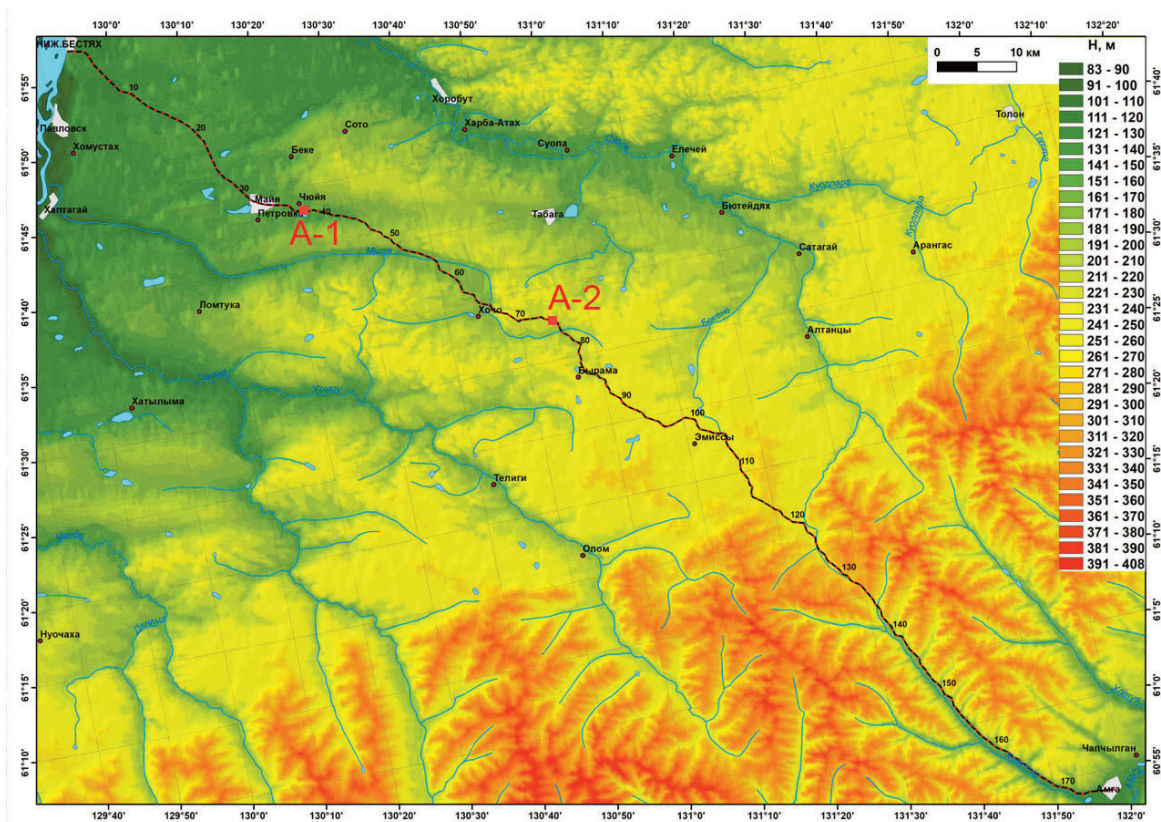


Рис. 1. Автомобильная дорога «Амга». Красными квадратами отмечены ключевые участки и их номера

сильно изъедена термокарстовыми впадинами, что привело к образованию типично аласного и аласно-долинного рельефа. Глубина котловин термокарстовых озер и долин достигает 15-20 м. Характерной особенностью водораздельных термокарстовых котловин абалахской террасы является слабое развитие в них булгунняхов. На территории Абалахской террасы р. Лены особенно широко развиты повторно-жильный и текстурообразующие льды. Повторно-жильные льды в зависимости от типов местности имеют разную мощность. В среднем вертикальная мощность ледяных жил колеблется от 15 до 25 м, ширина достигает 6-7 м. В тоже время встречаются крупные жильные льды с мощностью 40-65 м, которые были вскрыты бурением на межаласьях в сингенетически промерзших супесчано-суглинистых отложениях. По данным М.С. Иванова [2] в скважине, пробуренной на междуречье Суола и Тамма, повторно-жильный лед вскрыт до глубины 61 м.

В рамках изучения инженерно-геокриологических условий и создания опытно-экспериментальных полигонов по трассе автодороги «Амга» были выбраны два ключевых участка, характерные для этой трассы и характеризующие разные типы мерзлотных ландшафтов. В пределах этих участков были проведены буровые, геофизические и мерзлотно-ландшафтные исследования.

Ключевой участок А-1 расположен на 37 км автомобильного тракта «Амга» в урочище Чюя на Абалахской надпойменной террасе Лено-Амгинского междуречья (см. рис.1). Основным типом рельефа является эрозионно-аккумулятивный (межаласный) и термокарстовый (аласный). Наряду с мелкими, пересыхающими речками здесь широко развиты аласы глубиной до 8-15 м с произрастанием лиственничных лесов с кустарничково-моховым покровом. Борта термокарстовых котловин крутые. Склоны южной экспозиции осложнены былларами или байджарахами, а северные покрыты лесом. На дне котловин развиты разнотравно-злаковые луга и остаточные озера. Нередко на этих аласах встречаются булгунняхи.

Автодорога здесь пролегает по бровке борта аласной котловины с крупным озером. Днище этой термокарстовой впадины находится гипсометрически на 10 м ниже от уровня межаласья. На этом участке было пробурено 4 скважины глубиной от 15 до 25 м (рис.2а).

Инженерно-геологический разрез исследуемого участка характеризуется наличием пород ледового комплекса с крупными повторно-жильными льдами. По данным бурения вертикальная мощность этих льдов составляет 13-14 м. Сильнольдистые супеси вмещают повторно-жильные льды в составе отложений ледового комплекса (рис. 3а). Криотекстура супесей, микролинзовидная и слои-



Рис. 2. Спутниковые снимки ключевых участков: а – А-1; б – А-2



Рис. 3. Фрагменты кернов скважин: а – повторно-жильный лед в керне Сква. А1-3; б – текстурообразующий лед в керне Сква. А2-1

стая. Ниже ледового комплекса залегают среднезернистые пески с массивным криогенным сложением. Бурением толща песков до конца не пройдена (вскрытая мощность 10 м). Выше пород ледового комплекса залегает небольшой горизонт суглинков с примесью органических веществ. Мощность горизонта изменяется по разрезу скважин от 0,2 до 1,2 м. Венчает инженерно-геологический разрез участка слой супесей с содержанием остатков растительного детрита. Анализ результатов буровых работ и геофизических исследований позволяет утверждать, что на этом участке автодороги повторно-жильные льды распространены почти повсеместно, за исключением аласных котловин.

В результате годового цикла наблюдений за температурным режимом грунтов земляного полотна и грунтов основания автомобильной дороги было выявлено, что глубина протаивания достигает 3,1 м, подошва слоя годовых теплооборотов находится на глубине 15 м, где температура грунтов равна минус 2,2° С (рис. 4).

Ключевой участок А-2 расположен на 75 км автодороги «Амга». Территория участка находится в пределах аласного типа местности (см. рис.2б).

В Центральной Якутии термокарст является одним из ведущих инженерно-геологических процессов. Он вызывает коренное изменение строения ледового комплекса, приводит к образованию глубоких просадочных и провальных форм рельефа [2]. Термокарстовые формы рельефа выполнены своеобразными отложениями, отличающимися от других генетических типов. П.А. Соловьев [4] дал первое определение этих отложений и назвал их аласными.

Термокарстовые отложения формируются в закономерной последовательности во времени и пространстве. Мощность, состав, льдистость и криогенное строение этих отложений зависит, преж-

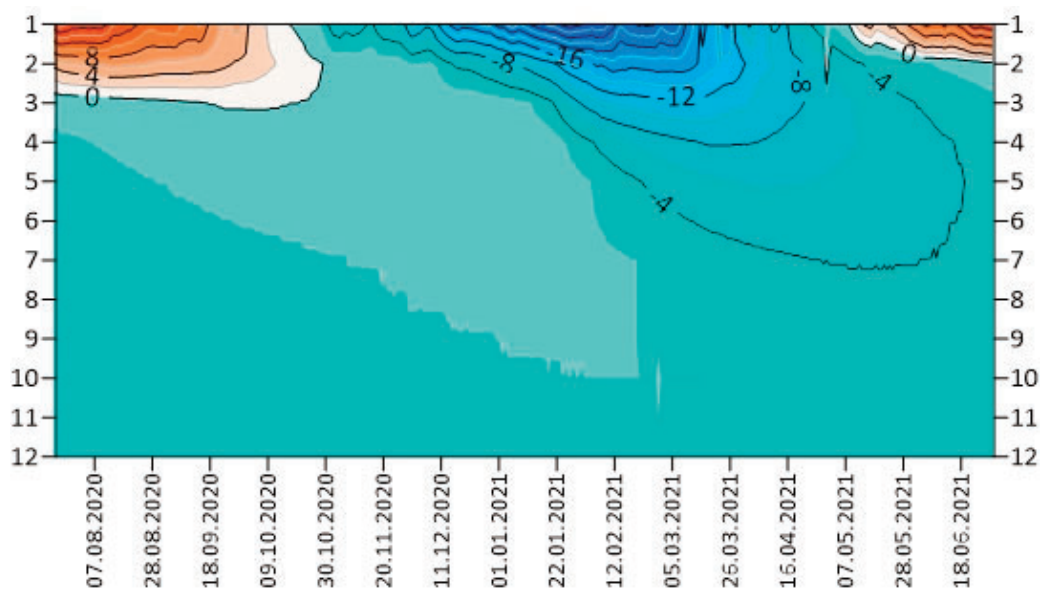


Рис. 4. Температурный режим грунтов земляного полотна и грунтов основания в межлассном типе местности (скв. А1-3)

де всего, от того, на каком этапе развития находится та или иная котловина. Днища молодых термокарстовых котловин заняты деформированными оттаявшими породами ледового комплекса. Полный комплекс термокарстовых отложений образуется в зрелых котловинах. Полноводные впадины интенсивно расширяются и углубляются за счет вытаивания ледового комплекса. Важная роль в этом процессе принадлежит озерам, которые ускоряют развитие термического карста и определяют водный характер термокарстовых отложений. Отложения, формирующиеся в зрелых аласах, характеризуются пестрым составом: озерные фации, торфяно-болотные образования и конусы выноса. Их общая мощность изменяется от 4 до 20 м [2].

На территории ключевого участка А-2 при проведении буровых работы были вскрыты аласные отложения мощностью от 7,5 до 11,0 м. Эти образования не содержат крупные тела подземного льда, но за счет содержания большого количества текстурообразующего льда относятся к сильнольдистым грунтам (рис. 3б). По классификации криогенных текстур термокарстовых отложений М.С. Иванова [2], эти текстурообразующие льды относятся к линзовидно-дендритовым, которые представляют собой ломаные горизонтальные ледяные линзы, разветвляющиеся на концах. Отложения с такой криогенной текстурой относятся к фации прибрежной части неглубоких озер и промерзающих до дна водоемов. Они встречаются в разрезах небольших замкнутых котловин и формируются в основном при горизонтальном фронте промерзания осадков. Толщина шпиров льда изменяется от 1-2 до 5-10 мм. При этом суммарная влажность грунтов достигает 50-60%. В результате годового цикла наблюдений за температурным режимом грунтов земляного полотна и грунтов основания автомобильной дороги было выявлено, что глубина протаивания составляет 2,1 м, подошва слоя годовых теплооборотов находится на глубине 15 м, где температура грунтов равна минус 1,8° С (рис. 5).

Автомобильная дорога «Амга» пролегает по территории со сложными инженерно-геокриологическими условиями. При современных изменениях климата мерзлотные ландшафты с сильнольдистыми породами являются одними из наиболее уязвимых природно-территориальных комплексов, а изменение (деградация) мерзлых грунтов основания и развитие негативных криогенных процессов (образование пучин, солифлюкция, суффозия, выдавливание грунтов оснований дорожных одежд, проседание и деформация конструктивных элементов) являются и будут являться в дальнейшем одной из основных причин деформаций автомобильной дороги.

Особую озабоченность по устойчивости и состоянию дороги вызывают места ее прохождения в непосредственной близости к термокарстовым озерам. В условиях прохождения основания насыпи по береговой кромке высока вероятность ее разрушения в ближайшие годы, как за счет криогенных процессов в насыщенных влагой грунтах насыпи (пучение, солифлюкция, суффозия), так и в результате увеличения зеркала термокарстового озера.

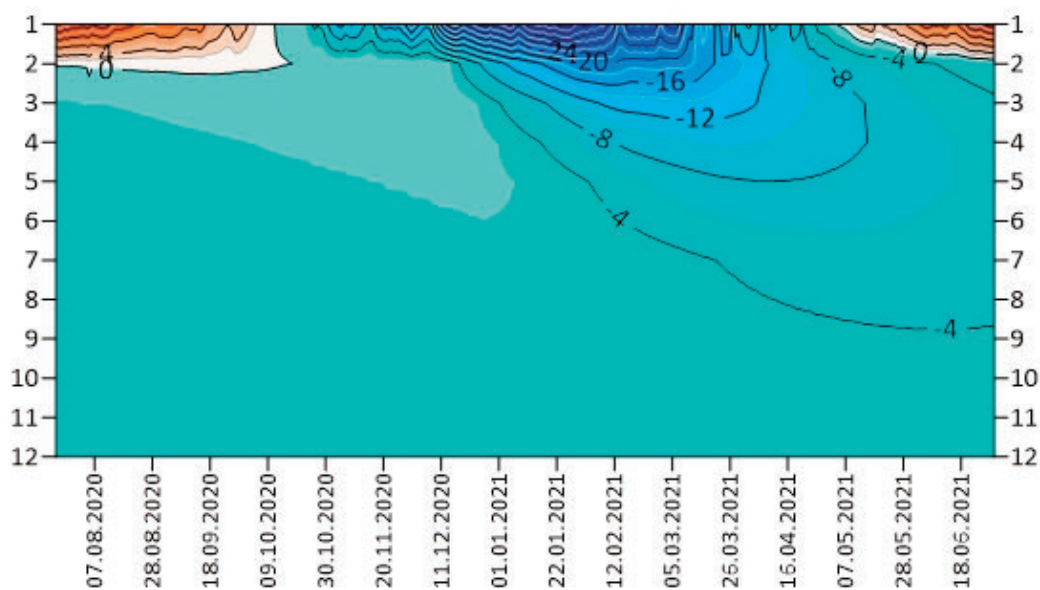


Рис. 5. Температурный режим грунтов земляного полотна и грунтов основания на аласном типе местности (скв. А2-2)

В 2025-2026 гг. ГКУ «Управление автомобильных дорог Республики Саха (Якутия)», планирует устройство дорожного покрытия капитального типа на всем протяжении этой дороги. Следует отметить, что без детальной оценки инженерно-геокриологических условий и корректировки проектных решений по высоте и конструкции насыпи, устойчивость автомобильной дороги; на некоторых участках; весьма проблематична, и в ближайшее время после ввода дороги в эксплуатацию; приведет к значительным деформациям и дополнительным затратам на ремонтные работы. Кроме того, на участках с близким залеганием подземных льдов и низкой насыпью, необходим подбор индивидуальных проектных решений.

Незавершенные работы по инженерно-геокриологическому районированию этой дороги, начатые в 2020 году и проведение научного сопровождения при проектно-изыскательских работах несомненно позволили бы построить качественную автомобильную дорогу с контролем состояния и разработкой превентивных мероприятий для эффективной её эксплуатации.

Литература

1. Железняк М.Н., Шестернев Д.М., Литовко А.В. Проблемы устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне// Мат-лы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций. Москва, 2018. Изд-во МАДИ. с.74-79
2. Иванов М.С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск, Наука, 1984, 126 с.
3. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб: 1 500 000 / [ред. М.Н. Железняк]. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2017, 2 л.
4. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М., Изд-во АН СССР, 1959, 144 с.
5. Шестернёв Д.М. Основные принципы организации геокриологического мониторинга линейных сооружений (на примере железной дороги «Беркаит-Томмот-Якутск») /Д.М. Шестернёв// Проблемы инженерного мерзлотоведения. Материалы IX международного симпозиума 3-7 сентября 2011 г. в г. Мирном. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2011, с. 253-259

К ПРОГНОЗУ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛОТЫ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ДОРОЖНОЙ НАСЫПИ (НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ «АМУР»)

Г.С. Типенко, Д.О. Сергеев, А.Н. Хименков, В.П. Мерзляков, А.П. Кулаков,
Е.О. Дернова, Д.С. Савченко

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2
E-mail: gstipenko@mail.ru

Современный опыт изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог свидетельствует о недостатке современных удобных инструментов, помогающих оценивать текущую ситуацию и составлять геокриологический прогноз на срок эксплуатации сооружений [6]. Чтобы выполнить прогноз, необходимо разработать математическую модель теплообмена в природно-технической системе (ПТС). Представленная модель отличается от других постановок тем, что она была параметризована с учётом фактических данных изысканий и откалибрована по данным мониторинговых наблюдений.

Изученный участок дороги расположен на федеральной дороге общего пользования «Амур» на 288 километре трассы Чита-Хабаровск. Данный участок подвергался деформациям в течение десятилетнего периода эксплуатации. После капитального ремонта в 2022 году, по инициативе ФКУ Упрдорзабайкалье на участке был размещён пост геотехнического мониторинга. Благодаря полученным данным о геологическом строении [8], свойствах грунтов [2] и термометрическим данным [9], была сформирована гипотеза о ведущей роли многолетнего оттаивания вечной мерзлоты в ряду причин деформации дорожной насыпи. В связи с этим главным вопросом эксплуатации дороги в настоящий момент представляется судьба сохранившегося ледяного тела, расположенного под южным откосом насыпи. Для реализации модели в запланированные сроки сложный геологический разрез был упрощён (см. таблицу 1).

Таблица 1

Упрощение геологического разреза, приведённого к системе горизонтальных слоёв, принятое для моделирования условий до и после реконструкции насыпи в 2010 году

| Номер слоя | Состав грунта | Глубина кровли от ненарушенной поверхности, м | Глубина кровли от поверхности насыпи, м | Толщина слоя, м |
|------------|---------------------------------------|---|---|-----------------|
| 1 | Грунтогравийная смесь (насыпь дороги) | — | 0 | 5 |
| 2 | Суглинок мягко-пластичный | 0 | 5 | 3 |
| 3 | Суглинок текучий | 3 | 8 | 1 |
| 4 | Ледогрунт | 4 | 9 | 3 |
| 5 | Песок средней крупности | 7 | 12 | 2 |
| 6 | Глина тугопластичная | 9 | 14 | 81 |

Теплофизические свойства грунтов (табл. 2) и кривые незамёрзшей воды задавались с учётом лабораторных испытаний, проведённых на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова [4]. Свойства природных и насыпных грунтов задавались с учётом нормативной и опубликованной литературы [2, 7]. Климатические данные были получены во Всероссийском

научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации (Мировой центр данных) по технологии АИСОРИ [1].

Кроме принятого геологического разреза, были сделаны и другие упрощения. В частности, не учитывались:

- снежный покров (средняя толщина снежного покрова – 7 см);
- наличие водотока к северу от дорожной насыпи;
- наличие и динамика подземных вод;
- наличие асфальта на дороге;
- каменные наброски на откосах насыпи (сооружены в 2020 г.);
- возможное залегание льда в виде вертикальных клиновидных жил.

Перечисленные упрощения позволили получить «базовое» температурное поле, которое будет уточнено по мере поэтапного усложнения модели.

| Таблица 2 | | | | | | | | |
|---|---|-------------------------------|-----------------|-----------------------------------|--|---------|---------------------------------------|---------|
| Теплофизические свойства грунтов, принятые в модели | | | | | | | | |
| № слоя | Название грунта | Весовая влажность W , кг/кг | Пористость, n | Температура начала замерзания, °C | Теплоёмкость c , МДж/(м ³ ·K) | | Теплопроводность λ , Вт/(м·K) | |
| | | | | | таялая | мёрзлая | таялая | мёрзлая |
| 1 | Грунтогравийная смесь (насыпь; свойства согласно ВСН 84-62) | 0.093 | 0.16 | 0 | 2.947 | 2.034 | 1.25 | 1.57 |
| 2 | Суглинок мягкопластичный | 0.298 | 0.30 | -0.1 | 2.438 | 3.220 | 1.15 | 1.83 |
| 3 | Суглинок текучий | 0.370 | 0.49 | -0.1 | 3.175 | 2.306 | 1.27 | 2.14 |
| 4 | Ледогрунт | | 1.00 | 0 | 4.186 | 2.060 | 0.56 | 2.20 |
| 5 | Песок средней крупности | 0.200 | 0.33 | -0.1 | 2.631 | 1.966 | 1.27 | 1.89 |
| 6 | Глина тугопластичная | 0.290 | 0.44 | -0.1 | 3.171 | 2.453 | 1.08 | 1.66 |

Целью моделирования является описание ретроспективной и прогнозной динамики границ мёрзлого массива, оценка относительного вклада в эту динамику климатических изменений, изменения гидрологических и гидрогеологических условий, а также техногенеза в части изменения геологического строения и характера наземных покровов. Однако на этом этапе рассматривалась постановка задачи, учитывающая только кондуктивный теплоперенос, в зависимости от климатического хода температуры воздуха.

Численный эксперимент включил в себя следующие этапы (операции):

1) Ретроспективное моделирование периодически установившегося режима по среднесуточным характеристикам климата за 30-летний интервал, предшествующий не менее 20 лет строительству насыпи. Продолжение ретроспективного моделирования с учётом реального суточного хода температуры воздуха (был получен по данным метеостанции Сретенск).

2) Моделирование температурного режима под насыпью за период 2010 г. – осень 2022 г., верификация моделирования по начальному замеру в мониторинговых скважинах.

3) Прогнозное моделирование температурного режима под насыпью и в её окрестности на 10 лет вперёд с фиксацией климатических характеристик 2022 года.

В результате первого этапа моделирования было получено квазистационарное температурное поле, соответствующее климатическим условиям периода 1960 – 2010 г.г. Расчётная среднегодовая температура пород составила -3°C на глубине проникновения сезонных колебаний, что примерно на градус ниже региональных характеристик многолетнемёрзлых пород, опубликованных в литературе [3]. Данное расхождение обусловлено недоучётом маломощного снежного покрова, который в шестидесятых – семидесятых годах был несколько толще, чем наблюдается в настоящее время.

После сооружения насыпи в 2010 году температурное поле на глубинах до 45 метров начинает существенно изменяться (рис. 1). Происходит отепление грунтового массива на глубине 10 м до -2°C. Причиной этих изменений является возникновение «нулевой завесы» в виде круглогодич-

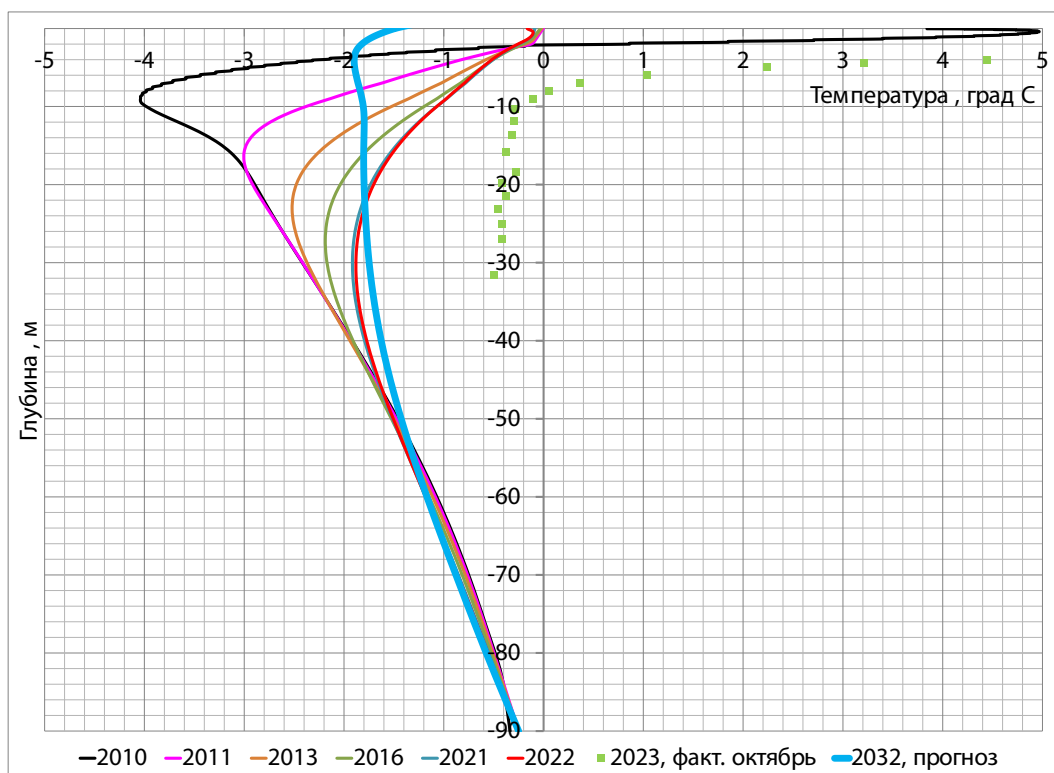


Рис. 1. Динамика распределения сентябрьской температуры по глубине для оси дороги по годам при строительстве насыпи в начале лета 2010 г.

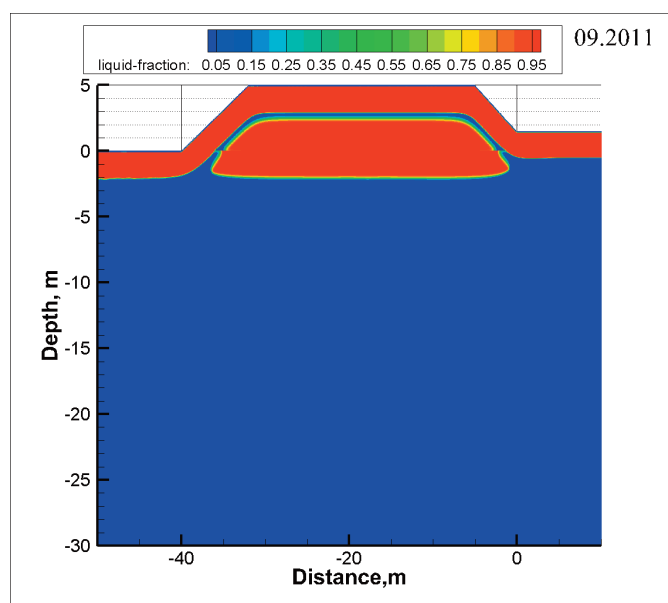


Рис. 2. Содержание жидкой фазы воды к сентябрю 2011 года при строительстве насыпи в июне 2010 г. (красный цвет соответствует талой зоне)

ного талика (рис. 2). Важным фактором направленности изменения мощности и конфигурации талика был сезон сооружения насыпи. В тех случаях, когда насыпь сооружалась в зимний период (вариант I), её ядро на момент максимального сезонного оттаивания сохранялось мёрзлым. Это влияние насыпи прослеживается до глубин 20 - 25 м. Однако при строительстве насыпи в летний период (вариант II) под дорогой формируется зона относительного растепления (рис. 2). В Зоне растепления формируется круглогодичный талик мощностью около 5 метров (рис. 3).

Локальные минимумы на красном графике (рис. 4) показывают толщину талой области под дорогой, а максимумы дают совместную толщину сезонно-талого слоя, плюс толщину талика. Из

анализа рисунка 4 видно, что диссипация таликовой зоны длится до 2027 года, и в дальнейшем талик исчезает, а мощности сезонно-талого слоя вне дороги и по её оси становятся практически одинаковыми.

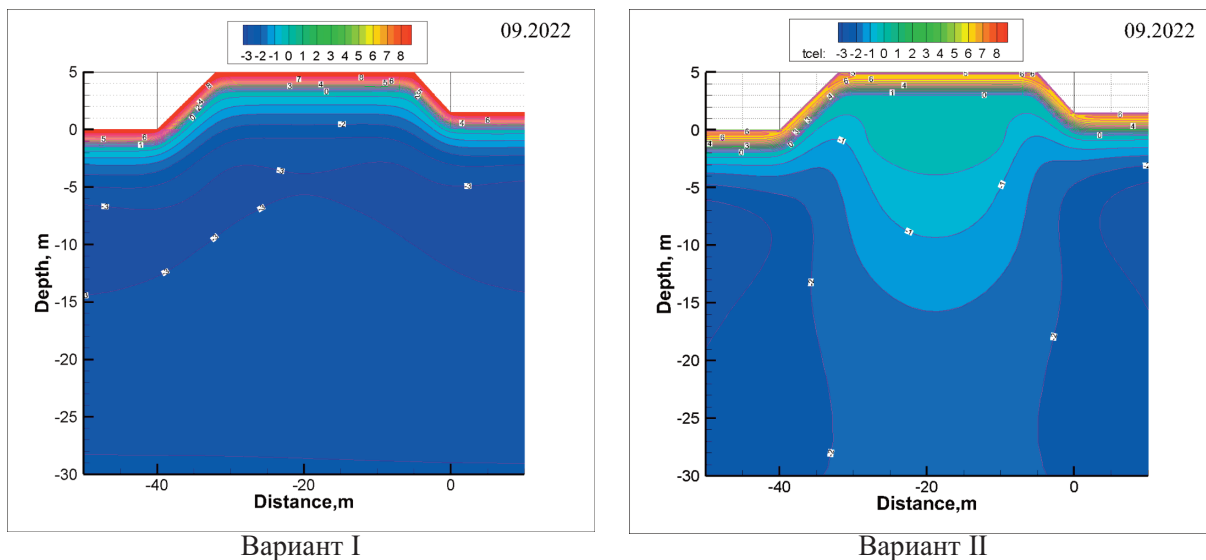


Рис. 3. Температурное поле к сентябрю 2022 года. Вариант I - при строительстве насыпи в январе 2010 г.; вариант II - при строительстве насыпи в июне 2010 г.

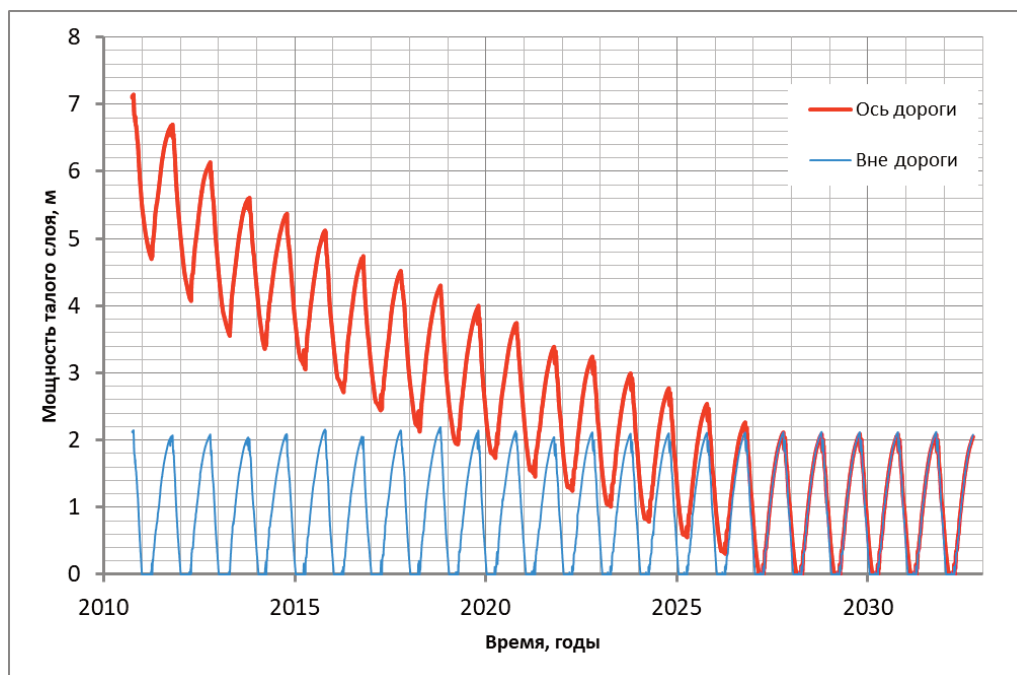


Рис. 4. Изменение мощности талого слоя над кровлей вечной мерзлоты при строительстве насыпи в начале лета 2010 г.

Нужно учесть, что дополнительное увеличение глубины протаивания под дорогой может быть связано с радиационным теплообменом, при котором асфальтовое покрытие поглощает существенно большую часть радиационного потока в летний период, чем растительность. Тем не менее, отличия в температурном поле продолжают оставаться, но уже без талика, и связаны они с влиянием насыпи, которая является дополнительным термическим сопротивлением.

После десятилетнего периода эксплуатации дороги конфигурация температурного поля продолжала меняться. В случае сооружения насыпи в зимний период охлаждающее влияние кондуктивной теплопередачи сохраняется. Это обусловлено увеличением площади теплоотдачи и некоторым рас-

средоточением теплопотока из глубины. В реальности асимметрия поля должна была проявиться сильнее, поскольку для Забайкалья характерна интенсивная коротковолновая радиация, которая сильнее нагревает южный откос насыпи, особенно в период с марта по сентябрь. «Навстречу» эффекту кондуктивного охлаждения работает эффект охлаждения поверхности за счёт испарения влаги, которое существенно ниже на насыпном дренированном грунте по сравнению с окружающим ландшафтом.

В случае сооружения насыпи летом, она оказывает выраженное утепляющее воздействие. Представляется важным, что непромерзающая таликовая зона может служить естественным резервуаром для круглогодичной фильтрации воды вдоль осевой линии дороги, вызывая эффекты оттаивания или пучения при колебании климатических условий. Отметим, что за время эксплуатации дороги размеры талика, как вертикальные, так и горизонтальные, существенно уменьшаются, происходит диссипация температурного возмущения, вызванного укладкой насыпи дороги в летний период теплым талым грунтом

Приведённые расчёты свидетельствуют о существенном влиянии насыпи на температурный режим подстилающего грунтового массива. Одновременно они демонстрируют отличие упрощённой численной модели от реальности: ледяной слой на самом деле вытаял под осевой частью дороги, что и привело к её деформациям. Полученные модельные температуры также различаются примерно на градус, по сравнению с данными геотермического мониторинга (рис. 1). Этот факт позволяет сделать вывод о том, что ведущим фактором растепления на данном участке является не только теплопередача от воздуха, но и перенос тепла фильтрующимися водами (об этом косвенно свидетельствует быстрое растепление средней части разреза в июне в наблюдательных скважинах под откосами насыпи), а также радиационный прогрев асфальтового покрытия. Видно, что применённая инженерная защита в виде крупноглыбовой наброски на откосах дорожной насыпи эффективна, поскольку приводит к смыканию деятельного слоя на краевых частях дороги к апрелю. Это пока предохраняет остатки ледяного тела от многолетнего оттаивания. Однако в случае малоснежной зимы или аномально жаркого или влажного лета этой защиты может не хватить. Формирование заболоченного участка в примыкании к южному откосу насыпи также может способствовать протаиванию.

В качестве практических рекомендаций следует указать на развитие поста геотехнического мониторинга в части гидрогеологических наблюдений, а также совершенствование разработанных моделей модулями учёта радиационных и конвективных составляющих теплообмена, включая влияние каменной наброски и миграции подземных вод.

Проведённый численный эксперимент показал важность организации глубинных термометрических наблюдений для понимания динамики температурных полей. В рассмотренном случае глубина зоны влияния дороги в ПТС за десять лет достигла 45 метров (рис. 1).

Анализ соотношения талых и мёрзлых зон в ПТС позволяет выявить моменты коренной перестройки геокриологических условий, к которым часто приурочены периоды активизации или затухания неблагоприятных процессов. Проведенные расчёты позволяют оценить скорость процессов, происходящих как в теле насыпи, так и в основании – на глубинах 0-40 м, а также сделать прогноз на ближайшие 10 лет.

Авторы планируют развитие применённого подхода в части учёта переноса тепла фильтрацией в грунте и течением по придорожным канавам или дренажным трубам поперёк и вдоль дороги (расширенная гидролого-гидрогеологическая модель в серии двухмерных сечений или в трёхмерной постановке), а также в направлении исследования роли аномальных погодных условий в эволюции температурного режима грунта, учёта радиационного теплообмена, эффектов, связанных с испарением с поверхности и заболачивания. Данные усложнения позволят в будущем ставить и решать совместные термомеханические задачи для основания насыпи и для дорожных одежд.

На современном этапе исследований показана роль моделирования в процедуре научного сопровождения изысканий, строительства и эксплуатации линейных транспортных сооружений. Оценка геокриологической опасности опирается в равной степени на геокриологическое районирование, геотехнический мониторинг, расширенный в части геокриологических наблюдений, а также на моделирование, являющаяся основным инструментом геокриологического прогноза. Геокриологическое районирование позволяет определить правильность выбора участков геотехнического мониторинга, их представительность и одновременно обеспечить обоснование участков, нуждающихся в геокриологическом прогнозе. Геотехнический мониторинг необходим для получения информации

о закономерностях теплообмена, летних трендах его изменения. Данные геотехнического мониторинга используются для калибровки и верификации прогнозных моделей, а также схем инженерно-геологического районирования.

Математические модели теплообмена являются основой для выявления ведущего фактора неблагоприятного процесса, ответственного за деформацию насыпи.

Литература

1. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 от 23 октября 2014 г. Ссылка проверена 09 ноября 2024 г.: <<http://aisorim.meteo.ru/waisori/>>
2. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Якутск, 1999, 362 с.
3. Геокриология СССР. Горные страны юга СССР / Под ред. Э.Д.Ершова. М.: Недра, 1989, 359 с.
4. Лабораторные исследования состава и физико-механических свойств грунтов на участке 288 км автомобильной дороги общего пользования федерального значения «Амур». Отчёт о НИР. Отв. Исп. Карпенко Ф.С. ИГЭ РАН, 2023, 100 с.
5. Методические рекомендации по теплотехническому расчету насыпей автомобильных дорог. СоюздорНИИ, Москва, 1977, 17 с.
6. Мониторинг вечной мерзлоты. - М.: Академический проект, 2024, 463 с. DOI 10.61828/9785829142780-2024-1-468. ISBN 978-5-8291-4278-0. Авторский коллектив: Брушков А.В., Алексеев А.Г., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Осокин А.Б., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Бадина С.В., Великин С.А., Жданев О.В., Кузнецов М.Е., Малкова Г.В., Остарков Н.А., Фёдоров Р.Ю., Фролов К.Н.
7. ОДМ 218.2.061-2015 Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов. Росавтодор, Москва, 2015, 78 с.
8. Технический отчет о результатах работ по бурению скважин комплексного поста наблюдений за метеорологическими и мерзлотными условиями на км 288 автодороги Р-297 «Амур» Чита-Хабаровск. «ДОРМОСТПРОЕКТ», Чита, 2022 г., 63 с.
9. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Кулаков А.П., Романов А.В. — Особенности организации инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.4.68814 EDN: ICMZSC URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=68814

СЕКЦИЯ 6. СОХРАНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ ИСТОРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ЗАКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ

ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТЕРРИТОРИИ ПСКОВО-ПЕЧЕРСКОГО МОНАСТЫРЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СОХРАННОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

И.В. Аверин

ООО «Инженерная Геология», 121552, г. Москва, ул. Ярцевская, д.16, пом. I
E-mail: i.averin@mail.ru

Свято-Успенский Псково-Печерский монастырь – один из самых крупных и известных в России мужских монастырей с многовековой историей. В 2019 году, по поручению Настоятеля монастыря, Митрополита Тихона, впервые в истории обители были проведены масштабные инженерные изыскания, направленные на разработку противоаварийных мероприятий в связи с развивающимися на склонах оползневыми процессами, деформациями подпорных стен, изменениями микроклимата в пещерах, а также подготовкой монастыря к масштабной реконструкции.



Рис. 1. Развитие оползня вблизи Тайловской башни и трещины в сооружениях, расположенных вдоль «Кривавой» дорожки

Рельеф исследуемой территории является результатом длительного геологического развития. В дочетвертичное время основной формой рельефа являлось Девонское плато, приуроченное к выходу наиболее устойчивых пород – песчаников швентойского горизонта. Следующий этап развития рельефа происходит до наступления валдайского оледенения, либо на самой ранней его стадии, когда в западной части формируется эрозионная палеоложбина, впоследствии заполненная песчано-глибовым материалом (см. рис.2). На этой же стадии, под воздействием прирусловых водных потоков, в правом борту палеоложины в результате эрозионных и суффозионных процессов происходит формирование пещер, часть из которых сохранилась до настоящего времени. Следующий этап развития рельефа приурочен к верхневалдайскому стадийному горизонту и связан с наступлением ледника и последующим образованием холмисто-моренного рельефа. Местность в данном районе представляла собой чередование отдельных холмов и понижений между ними. В пределах исследуемой территории морена повсеместно перекрыла коренные девонские породы, а также флювиогляциальные отложения.

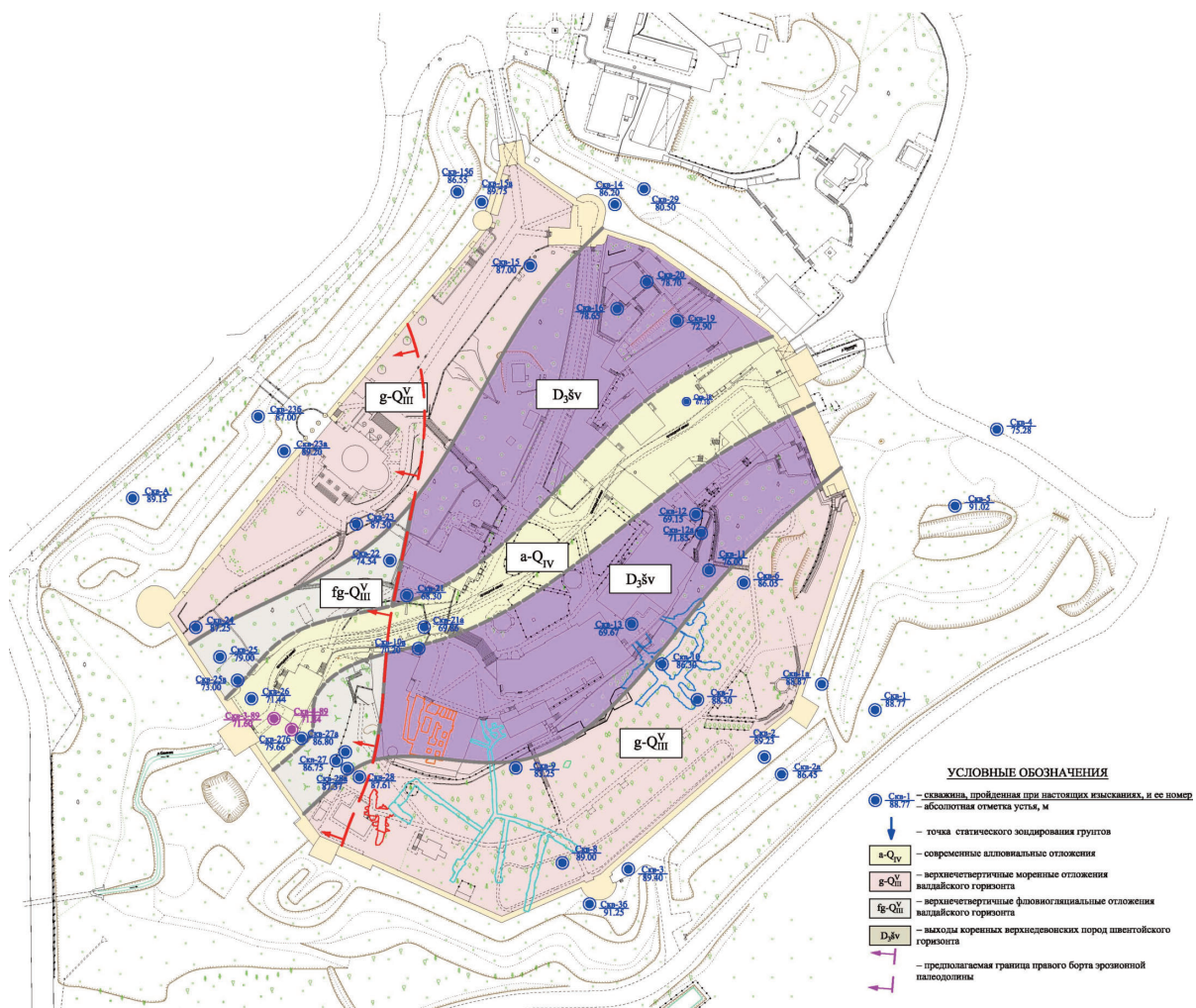


Рис. 2. Карта четвертичных отложений [1]

Далее, в голоцене, под воздействием эрозионной деятельности водного потока происходит образование овражно-балочной сети.

Формирование оврага, расположенного вкост палеоложины, привело к обнажению ее сечения и прирусловых пещерных образований, которые, согласно преданию, в 1392 году и дали начало монашеской жизни на территории монастыря.

На территории Псково-Печерского монастыря широкое развитие имеют оползневые процессы, заболачивание, провалообразование и плоскостная эрозия. Проведенные расчеты устойчивости склонов показали, что они в основном находятся в состоянии предельного равновесия – при оценке их общей устойчивости, а при оценке их локальных, наиболее крутых участков – от предельного равновесия до неустойчивого состояния.

Наибольшую опасность для исторического ландшафта и всего ансамбля Псково-Печерского монастыря представляют собой склоновые оползневые процессы, а также локальное обводнение песчаников Святой горки, в результате чего меняется микроклимат пещер и происходит их обрушение. В связи с этим была реализована система инженерно-геологического мониторинга, включающая в себя комплекс гидрогеологических и инклинометрических скважин.

Особенностью грунтов ледникового комплекса является сложное напластование суглинков и супесей, при котором грунтовые воды могут транспортироваться на достаточно отдаленные расстояния от зон питания. Разгрузка грунтовых вод осуществляется в местах нарушения сплошности глинистых грунтов, например в зоне провала, найденного в центральной части Святой горки, либо в местах где обводненные грунты контактируют непосредственно с песчаниками коренных отложений.

С целью изучения характера питания и транспортировки грунтовых вод, установления роли в этих процессах пожарного пруда и искусственного рва, в рамках гидрогеологического мониторинга

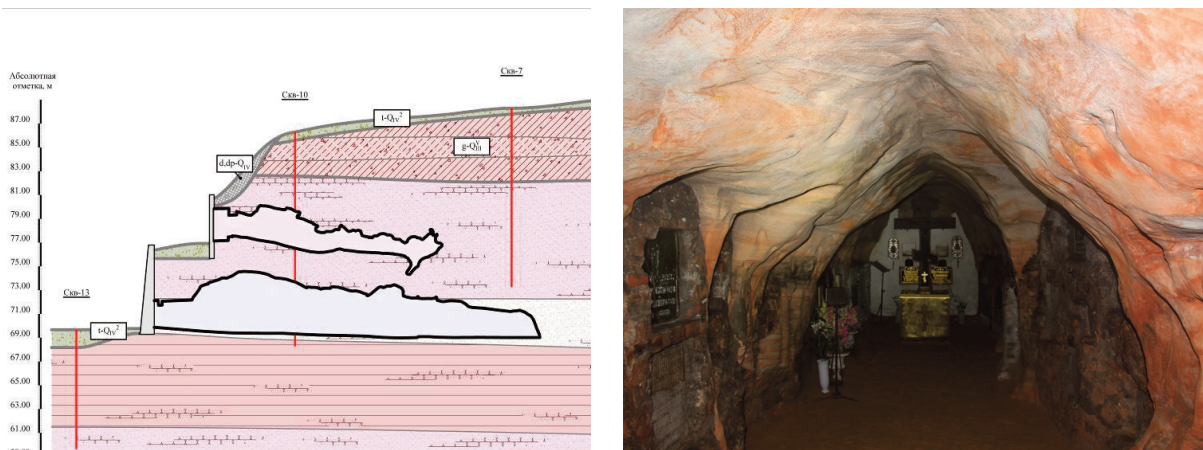


Рис. 3. Характерный инженерно-геологический разрез, проходящий через пещеры (слева), Богом зданные пещеры, расположенные в девонских песчаниках (справа)



Рис. 4. План расположения гидрогеологических и инклинометрических скважин

была применена сетка из шести скважин (см. рис.4), расположенных на пути предполагаемого транзита грунтовых вод.

В ходе мониторинга было установлено, что в скважине № ГГ-4, расположенной вблизи пруда, грунтовые воды фиксируются постоянно, что подтверждает, что он является доминирующим и постоянным источником питания. В скважинах №№ ГГ-5 и ГГ-6, расположенных на максимальном удалении от пруда, но перед искусственным рвом, грунтовые воды отсутствуют. В тоже время, на другой стороне рва, грунтовые воды присутствуют повсеместно. Гидрогеологические наблюдения показывают, что обводнение происходит со стороны пруда, а ров является искусственной дренай. Нижняя часть рва сложена частично водопроницаемыми грунтами, поэтому грунтовые воды дренируются в приповерхностной части тальвега, обводняя склоны на достаточном удалении от источника питания.

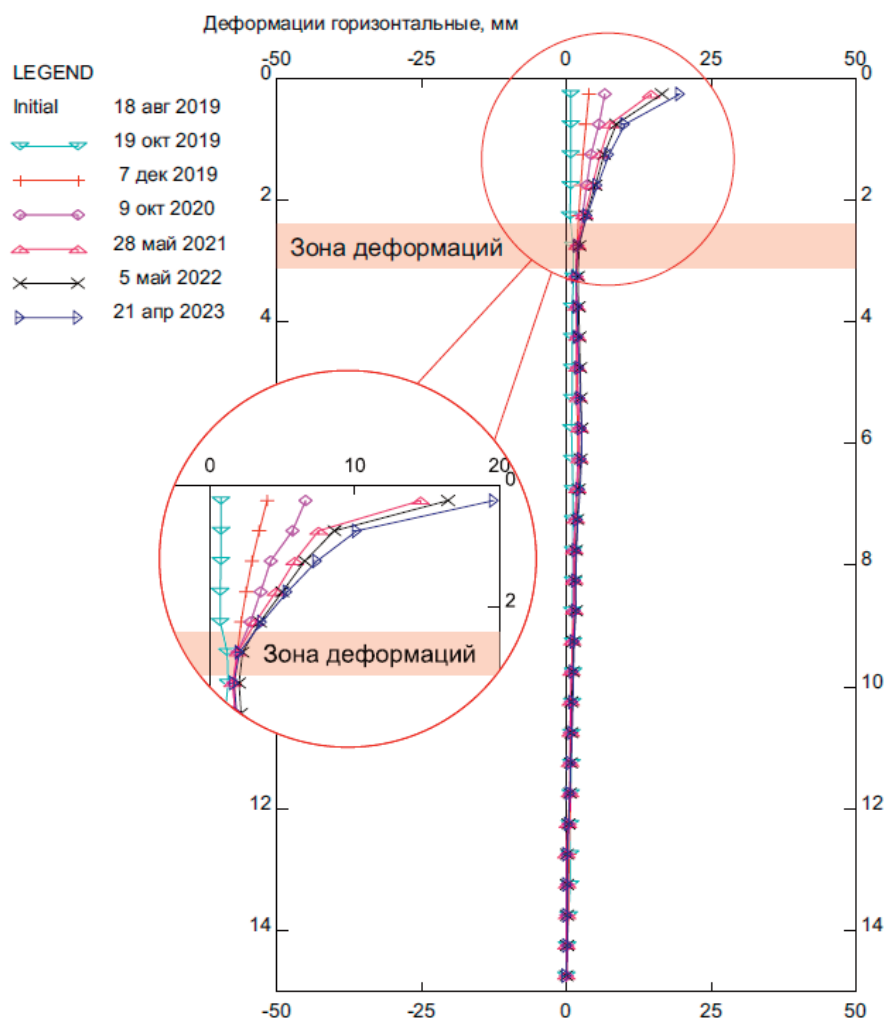


Рис.5. Сквжина И-1

Интенсивность развития данных грунтовых вод при существующих инженерно-геологических условиях имеет ключевое значение в формировании микроклимата Богом зданных пещер. В замоченных песчаниках резко изменяются теплопроводные и существенно снижаются прочностные свойства. В результате в пещерах на несколько градусов до несвойственных значений повышается температура и влажность, на сводах образуется высачивание грунтовых вод. Механизм разрушения массива песчаников при этом различный, но полностью зависит от степени водонасыщения. В результате проведенных исследований установлено, что при изменении влажности от природного значения $W=2,0\%$ до $W=14,8\%$, угол внутреннего трения изменяется от $\varphi=33^\circ$ до $\varphi=28^\circ$, а сцепление от $C=20$ кПа до $C=10$ кПа. При обводнении песчаника в два раза изменяется его удельное сцепление, которое определяет степень сцементированности и объясняет формирование обвалов грунта. Также при ярко-выраженной слоистой структуре песчаника по тонким слойкам более глинистых разностей грунта создаются условия формирования небольших линз грунтовой воды, далее при критических значениях гидростатического давления происходит их отслаивание и последовательное обрушение.

Замачивание грунтов создает угрозу сохранности пещер, их уникального микроклимата, а также негативно влияет на общую оползневую устойчивость склонов монастыря. В связи с этим было рекомендовано убрать пожарный пруд, осуществить комплекс мероприятий по обеспечению беспрепятственного стока поверхностных вод, как с поверхности всех искусственных рвов, так и локального понижения рельефа на месте существующего пруда.

После выполнения мероприятий гидрогеологические скважины были полностью осушены, исключение составляли периоды наиболее обильных осадков. В течение нескольких месяцев температура и влажность в пещерах пришли в норму, высачивание грунтовых вод в сводах пещер полностью прекратилось, а обрушение сводов минимизировалось.

С целью контроля оползневых деформаций было установлено 8 инклинометрических скважин.

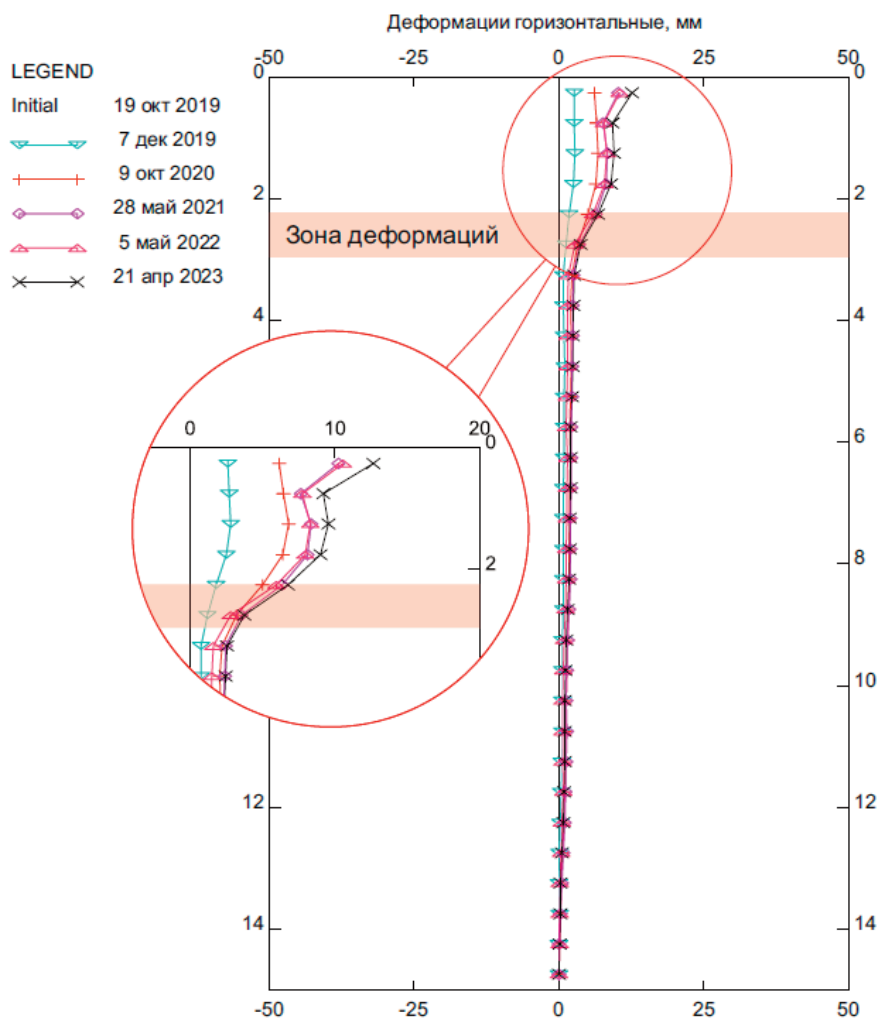


Рис.5. Скважина И-4

Инклинометрическая скважина И-1 установлена в верхней части склона, около Тайловской башни. Согласно проведенному расчету оползневой устойчивости, приповерхностная часть склона находится в неустойчивом состоянии. При этом, в целом, склон характеризуется как устойчивый. В процессе мониторинга на склоне фиксируется развитие оползневых деформаций на глубине 2,5 – 3,0 м. Максимальная амплитуда горизонтальных деформаций 19 мм. Средняя скорость развития деформаций составила 4,8 мм/год

В Тайловской башне на протяжении длительного времени был расположен туалет и к нему были подведены водонесущие инженерные коммуникации, на площадке перед башней были устроены выгребные ямы, здесь периодически происходили утечки, в результате чего склон обводнялся. Именно в этой зоне обнаружены деревья с характерными «саблевидными» изгибами стволов. В ходе масштабной реконструкции все инженерные коммуникации были заменены на новые, выгребные ямы ликвидированы, а к туалету подведена канализация.

Инклинометрическая скважина И-2 установлена в верхней части склона, в непосредственной близости от бровки, около Михайловского собора. Расчеты оползневой устойчивости показали, что склон находится в устойчивом состоянии. Инклинометрические наблюдения в течение четырех лет показали полное отсутствие в этой зоне оползневых деформаций.

Инклинометрическая скважина И-3 установлена напротив Церковной лавки и Тюремной башни внутри территории монастыря. Непосредственно в этой части склона оползневых процессов выявлено не было, подтвержденный расчетами оползень расположен ниже по склону. Проведенные в течение четырех лет наблюдения показали, что оползневые деформации отсутствуют.

Инклинометрическая скважина И-4 установлена с внешней стороны монастыря напротив монастырской трапезной, где в непосредственной близости расположен крепостной ров. В 2018 году, после вырубki и выкорчевки деревьев, в борту рва, стали развиваться локальные оползни. Расчеты

оползневой устойчивости показали, что борт крепостного рва в этой зоне находится в неустойчивом состоянии. По данным мониторинга, здесь фиксируется развитие оползневых деформаций на глубине 2,5 – 3,0 м. Максимальная амплитуда горизонтальных деформаций 13 мм. Средняя скорость развития деформаций составила 3,3 мм/год. Учитывая, что заглубление фундаментов Никольской церкви около 2,0 м, это может представлять угрозу для ее сохранности.

Инклинометрическая скважина И-5 установлена в верхней части склона Святой Горки около Архиерейского дома, вдали от бровки склона. В этой зоне оползневых процессов выявлено не было, подтвержденный расчетами приповерхностный оползень расположен ниже, на наиболее крутом участке склона. В течение всего периода наблюдений здесь фиксируется развитие разнонаправленных деформаций в диапазоне глубин 5,0 – 11,5 м, связанных с наличием здесь подземных пустот утраченных пещер.

Инклинометрическая скважина И-6 установлена в центральной части Святой горки над Богом зданными пещерами. За весь период наблюдений здесь фиксируется развитие деформаций около 2 см в диапазоне глубин 2,0 – 4,0 м, предположительно связанных с выпором грунта в сторону области разуплотнения, возможно в результате наличия здесь в непосредственной близости провала или захоронения. К оползневому процессу данные деформации отношения не имеют, оползневые подвижки в этой зоне отсутствуют.

Инклинометрическая скважина И-7 установлена над пещерами хозяйственного назначения, где в 2018 году было выявлено аварийное состояние подпорной стены верхней части склона. Проведенные расчеты оползневой устойчивости показали, что верхняя часть склона здесь находится в неустойчивом состоянии. В начальные периоды мониторинга фиксируется развитие незначительных деформаций, всего около 3 мм, на глубине 2,0 – 3,0 м. Процесс остановился после замены подпорной стены и укрепления этой части склона.

Инклинометрическая скважина И-8 установлена над Братским корпусом и зданием Трапезной. Проведенные расчеты оползневой устойчивости показали, что верхняя часть склона здесь находится в условно устойчивом состоянии. По результатам мониторинга фиксируется стабилизация наблюдаемых на начальном периоде незначительных оползневых деформаций на глубине 2,5 – 3,5 м. Максимальная амплитуда горизонтальных деформаций не превысила 4 мм.

Представленные результаты инженерно-геологических изысканий и мониторинга легли в основу масштабной реконструкции Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря. Строительные работы были проведены с учетом сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условий, выявленных специалистами ООО «Инженерная Геология». В процессе работ, опираясь на наши рекомендации, был восстановлен уникальный микроклимат Богом зданных пещер, проведен ряд противоаварийных мероприятий по восстановлению подпорных стен. 28 августа 2023 года Псково-Печерском монастырь отмечал праздник Успения Пресвятой Богородицы и 550-летие со дня своего основания. К этой дате было запланировано завершение большей части работ по реконструкции и прокладке инженерных коммуникаций, что и было успешно реализовано. В процессе строительных работ не было зафиксировано ни одной аварийной ситуации, связанной с потерей устойчивости склонов, что было подтверждено результатами инструментальных наблюдений в инклинометрических скважинах.

СПЕЦИАЛЬНОЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА МОСКВЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СОСТОЯНИЕ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ

Ф.К. Буфеев^{1,2}, Ю.В. Бревнов¹, Р.Ю. Жидков³, А.А. Орловский^{1,2}, В.С. Рекун³

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2

² МГРИ им. С. Орджоникидзе, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23

³ ГБУ «Мосгоргеотрест», 123040, г. Москва, Ленинградский пр-кт, д.11

E-mail: fbuffeev@mail.ru

Одним из основных компонентов, определяющих поведение исторических природно-технических систем, являются гидрогеологические условия. Их изменение влечёт за собой как изменение свойств грунтов основания [1], так и свойств фундаментов. В пределах исторических центров большого количества городов России одним из основных инженерно-геологических процессов является подтопление.

В 1986 году вышло пособие по проектированию оснований зданий и сооружений к СНиП 2.02.01-83 [2]. В нём застраиваемые территории по характеру их подтопления были разделены на естественно и техногенно подтопленные (временно или постоянно) и неподтопленные. Среди последних выделялись потенциально подтопляемые и потенциально неподтопляемые. К подтопленным были отнесены территории, на которых уровень подземных вод достигал или периодически достигает критических отметок.

Потенциально подтопляемыми были названы территории, на которых за расчетный срок возможно подтопление в результате их строительного освоения или изменения влажности грунтов до величин, вызывающих нарушения нормальных условий эксплуатации зданий и сооружений или территории в целом.

Была предложена оценка потенциальной подтопляемости территории на основании использования критерия потенциальной подтопляемости P , который зависит от:

- природных условий, в том числе литологических;
- от критического уровня подтопления;
- от положения уровня грунтовых вод;
- от величины возможного подъема уровня.

В современной редакции СП 22.13330.2016 [3] по характеру подтопления выделяются естественно или техногенно подтопленные территории (с глубинами залегания уровня подземных вод менее 3 м) и неподтопленные. Основными факторами подтопления названы изменение условий поверхностного стока, длительный разрыв между выполнением земляных и строительных работ, инфильтрация утечек, уменьшение испарения под зданиями и покрытиями.

Оценку потенциальной подтопляемости территории выполняют на основе прогноза изменения гидрогеологических условий площадки строительства и прилегающих территорий, конструктивных и технологических особенностей проектируемых (реконструируемых) сооружений и окружающей застройки. Потери водопотребления достигают 3,6-6,0% от общего водопотребления.

Отдельно отмечено, что если подземные воды или промышленные стоки агрессивны по отношению к материалам заглубленных конструкций, или могут повысить коррозионную агрессивность грунтов, следует предусматривать антикоррозионные мероприятия. При этом, вопрос изменения агрессивности подземных вод в процессе эксплуатации сооружения не затрагивается вовсе.

Развитие подтопления, как правило, вызывает негативные последствия [4]:

- деформации фундаментов и надземных конструкций зданий и сооружений, вызванные изменением прочностных и деформационных свойств грунтов, в особенности, обладающих специфическими свойствами (просадочность, набухание, выщелачивание, размокание);
- изменение химического состава, агрессивности и коррозионной активности грунтов и подземных вод;
- повреждение памятников истории и культуры, уничтожение уникальных ландшафтов.

Основными причинами возникновения и развития подтопления в городских условиях являются:

- техногенные утечки из водонесущих коммуникаций, недостаточная организация поверхностного стока на застроенных территориях, неэффективность ливневой канализации, нарушение естественного стока при проведении строительных работ;
- барражный эффект при строительстве заглубленных подземных сооружений, засыпке оврагов нефилтующим материалом, устройстве стен в грунте и свайных полей;
- конденсация влаги под основаниями зданий, элеваторами и другими сооружениями, асфальтовыми покрытиями на застроенных городских территориях.

Таким образом, в центрах исторических городов создаются благоприятные условия для повышения уровня подземных вод. В таком случае, одной из ключевых задач становится оценка влияния подтопления на состояние грунтов основания и конструкций фундаментов существующих сооружений. Для решения этой задачи необходимо оценить динамику изменения уровня и химического состава первого от поверхности водоносного горизонта. Но для начала необходимо точно установить критерии отнесения территорий к определённому классу с точки зрения подтопления.

Поскольку основная область интересов авторов в рамках данного исследования относится к памятникам архитектуры, подтопленными можно считать территории, в пределах которых фундаменты и конструкции сооружений находятся в непосредственном контакте с подземными водами, а потенциально подтопляемыми те, которые находятся в зоне сезонного колебания подземных вод (или в зоне капиллярной каймы) в силу естественных природных условий или техногенных факторов. Кроме того, необходимо учитывать возможность развития временных горизонтов спорадического распространения – верховодки.

Значительная часть фундаментов исторических сооружений Москвы имеет глубину заложения от 2 до 5 метров. Положение первого от поверхности уровня грунтовых вод в центре г. Москвы варьируется от 0.5 до более чем 20 м. Таким образом фундаменты и конструкции части ОКН будут являться подтопленными или потенциально подтопляемыми.

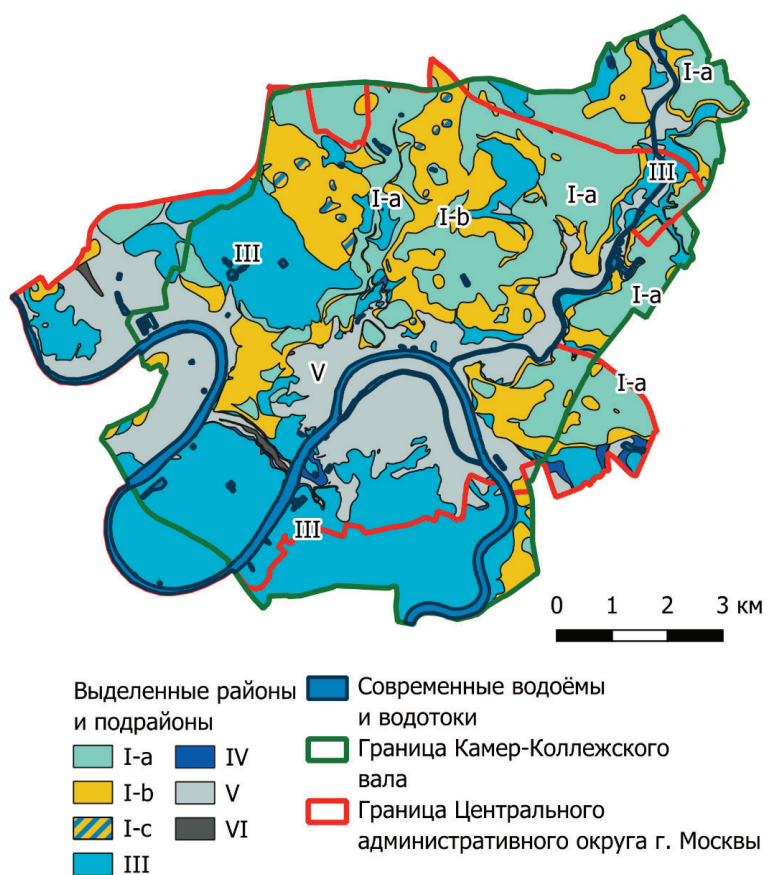


Рис. 1. Обзорная схема к карте специального инженерно-геологического районирования исторического центра Москвы для оценки влияния гидрогеологических условий на состояние фундаментов объектов культурного наследия

Авторы работы уже проводили анализ изменения гидрогеохимических условий в Москве, в том числе, в районе Хамовники [5]. Было установлено, что современный химический состав первого от поверхности водоносного горизонта в условиях подтопления вызывает растворение карбонатных материалов кладки.

В рамках настоящего исследования была рассмотрена историческая часть территории г. Москвы в границах объединенной территории Камер-Коллежского вала и Центрального административного округа. Площадь территории составила 87,1 км². В её пределах располагается 6185 объектов культурного наследия (75% от общего количества объектов в Москве). Из них 2490 представляют собой здания и сооружения, датированные XIV-XIX вв, в основании большей части которых заложен фундамент из известняка.

Для оценки условия взаимодействия объектов культурного наследия с грунтовыми водами было выполнено специальное инженерно-геологическое районирование территории. В качестве исходных данных при построении карты использовались результаты крупномасштабного картографирования 2010-2012 гг. [6] и данные трёхмерной геологической модели г. Москвы. Детальность карты соответствует масштабу 1:10000.

Таблица 1

| Критерии выделений районов и подрайонов при построении карты специального инженерно-геологического районирования исторического центра Москвы для оценки влияния гидрогеологических условий на состояние фундаментов объектов культурного наследия | | | |
|--|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Критерий выделения | Обознач. района/под района | Ср. глубина появления УГВ | Ср. отметка появления УГВ |
| Участки распространения первым от поверхности надморенного водоносного горизонта | I-a | 4,5 | 141,2 |
| Участки, в границах которых надморенный горизонт сдренирован или отсутствуют водовмещающие отложения | I-b | 9,6 | 139,5 |
| Участки распространения спорадических водоносных горизонтов | I-c | 3,2 | 149,1 |
| Участки распространения первыми от поверхности водоупорных отложений верхнеюрского возраста | III | 5,4 | 131,0 |
| Участки локального распространения первыми от поверхности относительно водоупорных среднеюрских континентальных отложений | IV | 18,8 | 115,5 |
| Участки распространения первыми от поверхности водоупорных отложений верхнекаменноугольного возраста | V | 7,4 | 120,9 |
| Участки взаимосвязи первого от поверхности водоносного горизонта и эксплуатационного подольско-мячковского горизонта | VI | 9,1 | 124,2 |

В качестве критерия для выделения таксонов первого уровня был определен характер распространения водоупорных толщ, которые изолируют первый от поверхности водоносный горизонт от более глубоких или, наоборот, выполняют для него экранирующую функцию (район Ib, табл. 1). В роли первого от поверхности водоупора в границах территории исследования выступают преимущественно ледниковые суглинистые отложения периодов днепровского и московского оледенения (подрайоны Ia, Ib, Ic, 42% площади территории), верхнеюрские глины (подрайон IIIa, 33% площади) и карбонатные глины верхнего отдела каменноугольной (район V (24% площади). Эрозионные окна (области взаимосвязи первого от поверхности водоносного горизонта с эксплуатационным подольско-мячковским водоносным горизонтом, район VI) и участки залегания первыми от поверхности относительно водоупорных среднеюрских континентальных отложений (район IV) распространены локально.

Заключение

В настоящей работе представлены результаты специального инженерно-геологического районирования исторического центра Москвы для оценки влияния гидрогеологических условий на состояние фундаментов объектов культурного наследия. Данная тема является крайне актуальной, поскольку влияние подземных вод на техническое состояние фундаментов объектов культурного

наследия практически не изучено. При этом, подтопление – один из наиболее распространённых процессов в пределах исторических городов, а изменение химического состава за счёт природных и техногенных факторов может вызывать изменение агрессивности подземных вод к материалам кладки фундаментов. Выполненное районирование позволит выполнить анализ изменения химического состава подземных вод и количественно оценить влияние подземных вод на состояние фундаментов памятников архитектуры.

Литература

1. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. *Инженерная геодинамика : учебник. – 4-е изд. доп. – М.: КДУ, 2015. – 472 с.*
2. *Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83).*
3. СП 22.13330.2016 *Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*.*
4. Аверин И.В., Ракитина Н.Н., Кокорев И.В., Букреев Д.С. «*Определение степени потенциальной подтопляемости и прогнозная оценка возможного изменения уровня грунтовых вод застраиваемых территорий*» *Вестник МГСУ, № 3, 2009, стр. 235-237.*
5. *Анализ влияния подземных вод на фундаменты объектов культурного наследия в районе хамовники г. Москвы Буфеев Ф.К., Бревнов Ю.В., Галкин С.Ю. В сборнике: Сергеевские чтения. Региональная инженерная геология и геоэкология. материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Москва, 2024. С. 120-123.*
6. Антипов А.В., Майоров С.Г., Осипов В.И. и др. *Инновационный проект по крупномасштабному специализированному геологическому картографированию территории города Москвы//Инженерные изыскания для строительства: практика и опыт Мосгоргеотреста (под ред. А.В. Антипова и В.И. Осипова). М.: Проспект, 2012, с. 154-180.*

ИЗУЧЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ИСТОРИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ НА ПРИМЕРЕ АНСАМБЛЯ КАЗАНСКИЙ КРЕМЛЬ

А.Н. Гараева, А.И. Латыпов, Э.А. Королев, Д.Р. Зарипова

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий,
420008 г. Казань ул. Кремлевская 4/5
E-mail: anastya-solnce@mail.ru

Архитектурным строительным комплексам, имеющим историческое значение, в последние годы уделяется повышенное внимание, как памятникам зодчества, имеющим всемирное наследие. Одним из таких культурно-исторических объектов является архитектурный ансамбль Казанского кремля, расположенный в центральной части города Казани Республики Татарстан [1]. Казанский кремль имеет длительную историю существования. Точная дата его создания не установлена. Однако, упоминание о нахождении на левом берегу реки Итиль (древнее наименование р. Волга) в месте впадения в нее притока небольшой речушки укрепительного сооружения Булгарского ханства было известно в конце X века. Изначально крепость-застава, а в последствии и оплот небольшого города, была деревянной. Лишь в 1445 году, после провозглашения независимости Казанского ханства, деревянные стены были усилены каменными элементами. В первоначальном виде каменный архитектурный ансамбль Казанского кремля начал формироваться в конце XVI века. В это время Иван Грозный приказал воздвигнуть на месте разрушенной Казани белокаменное сооружение по образу Кремля в Москве. Позднее строения Казанского кремля периодически перестраивались из-за частых пожаров. Лишь в XIX веке Казанский кремль приобрел современные черты. В 2000 г музей-заповедник «Казанский Кремль» был включен в список Всемирного наследия ЮНЕСКО [2].

Начиная с момента возникновения и до настоящего времени строительные сооружения Казанского кремля находились в тесном взаимодействии с земляными элементами грунтового массива. В процессе градоустройства территории постепенно менялся ландшафт местности, увеличивалась толщина насыпных грунтов и культурных слоев, возрастала нагрузка на грунтовые основания, трансформировались гидрогеологические условия участка. Увеличение плотности застройки и обустройство подземных частей сооружений способствовали изменениям напряженно-деформируемого состояние массива. В результате этого в последние годы на территории Казанского кремля активизировались такие негативные геодинамические процессы, как проседания грунтов и сходы оползней. Свой вклад в проблему деформаций грунтового массива вносят конструктивные особенности сооружений. Внутренние части стен кремля, сложенные «сбутовкой» (битый камень залитый раствором), способны впитывать в себя воду, увеличивая нагрузку на грунты оснований. Поэтому в дождливые периоды возрастает вероятность схода оползней.

Поскольку устойчивость грунтового массива к антропогенному воздействию определяется геологическими факторами, коротко рассмотрим особенности геологического строения участка расположения музей-заповедника «Казанский Кремль». Следует сказать, что весь архитектурный ансамбль Казанского кремля сосредоточен в пределах эрозионно-денудационного холма, склоны которого участками примыкают к речным долинам, либо оврагам. Холм представляет собой один из останцев, в основании сложенный карбонатными породами казанского яруса. С точки зрения тектоники холм-останец представляет собой одну из вершин поднятий Казакларского вала, входящего в систему Вятских Увалов. В период формирования речной долины реки Палео-Волга часть скального массива возвышенности Услонских гор было отрезана водным потоком, образовав самостоятельный элемент рельефа, часто именуемым, как «Чернышевский хребтик». Согласно буровым работам, в приповерхностной части холм-останец сложен коренными отложениями казанского яруса среднепермской системы, поверх которых со стратиграфическим несогласием залегают породы аллювиально-делювиального четвертичного комплекса. Казанский ярус представлен в нижней части светло-серыми, плотными доломитами с редкими включениями гипсовых линзочек. Несмотря на плотное сложение, породы секутся многочисленными тектоническими и экзогенными трещинами, обуславливающими хорошую дренированность останца. В кровле доломиты сильно-

выветрелые, вплоть до образования глинисто-доломитовой муки толщиной до 1,5-2,0 м. В слое карбонатно-глинистой муки отмечаются прослойки зеленовато-серой глины, сохранившиеся при выветривании карбонатных пород. В плотных слабо выветрелых доломитах присутствуют многочисленные каверны, оставшиеся при выщелачивании гипсовых агрегатов. На выветрелой поверхности доломитов залегают покровные отложения четвертичного чехла, представленные слоями суглинков, супесей и пылеватых и мелкозернистых кварцевых песков. Сверху геологический разрез венчают насыпные грунты мощностью до 3,5 м, сложенные неоднородным по составу и размеру природно-техногенным материалом.

Подобное строение грунтового массива, где в разрезе переслаиваются плотные и пористые породы, обуславливает относительно сложные гидрогеологические условия территории музей-заповедника «Казанский Кремль». В пределах холма развиты преимущественно грунтовые воды и воды верховодки. Их особенностью является прерывистость залегания, часто линзовидное обособление в песчаниках, окруженных плохо проницаемыми глинистыми грунтами. Воды безнапорные, со свободной поверхностью, по составу относятся к гидрокарбонатно-кальциевому и гидрокарбонатно-кальциево-магниевому гидрохимическому типам с минерализацией 0,3-0,5 мг/дм³. В дождливые периоды года наблюдается скопление подземных вод типа верховодка около подземных заглублений стен и фундаментов зданий архитектурного ансамбля Казанский кремль. В относительно засушливые времена уровень воды в водоносных прослойках понижается за счет нисходящей инфильтрации вниз по разрезу через толщи трещиноватых доломитов. Учитывая отсутствие на территории Казанского кремля открытых водоемов, основными источниками поступления в грунтовые толщи подземных вод являются инфильтрация атмосферных осадков, утечки из водонесущих коммуникаций, в летний период – искусственное орошение травяного покрова на склонах холма.

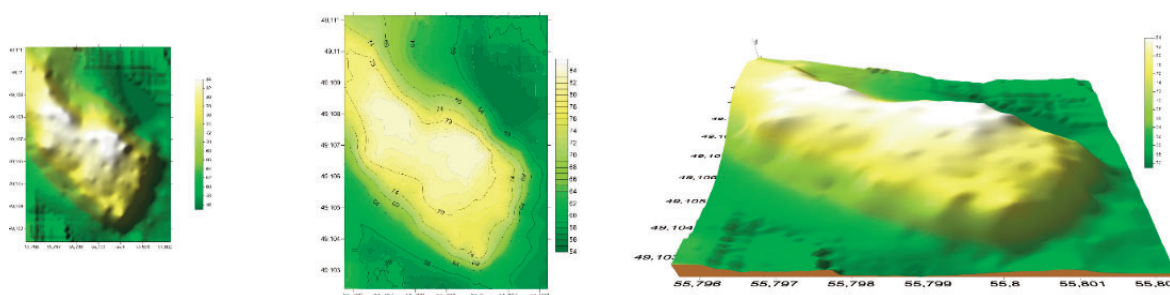


Рис. 1. Геоморфологическое строение «Чернышевского хребтика» с использованием программы Google Earth и Surfer

Особенностью грунтового массива в основании архитектурного ансамбля музей-заповедника «Казанский Кремль» является высокая антропогенная трансформация. Длительное преобразование поверхности его рельефа привело к выравниванию вершины холма и формированию оптимального угла наклона склонов до их устойчивого состояния (30-45°). В большинстве своем это достигалось за счет многократной подсыпки на неровные поверхности грунтового массива насыпных слоев с последующим их выравниванием, уплотнением и закреплением методом травосеяния. Наиболее мощные толщ насыпных грунтов (до 5,0-6,0 м) сформировались на бровках склона холма и на его крутопадающих боковых скатах. Последние работы по реставрации, когда произошло обрушение каменных стен Казанского кремля, показали, что данные фортификационные сооружения стоят не на коренных породах, а на неустойчивых техногенных грунтах. Имея неоднородное сложение и структуру, они способны аккумулировать в себе воды атмосферных осадков. Впоследствии из переувлажненных насыпных грунтов влага проникает во внутренние части каменных стен, увеличивая их вес, а, следовательно, и нагрузку на грунты оснований. Возрастание статической нагрузки приводит к постепенному выжиманию из насыпных грунтов свободной поровой воды и переуплотнению минеральных зерен. Процесс переуплотнения идет неравномерно, более активно с внешней стороны каменных стен, менее активно с внутренней. За счет этого с течением времени стены кремля приобретают наклон в сторону внешнего контура, по каменной кладке развиваются вертикальные трещины, постепенно выпадают каменные блоки. Формирование в насыпных грунтах вод верховодки также вносит свою лепту в разрушения архитектурного ансамбля Казанского кремля.

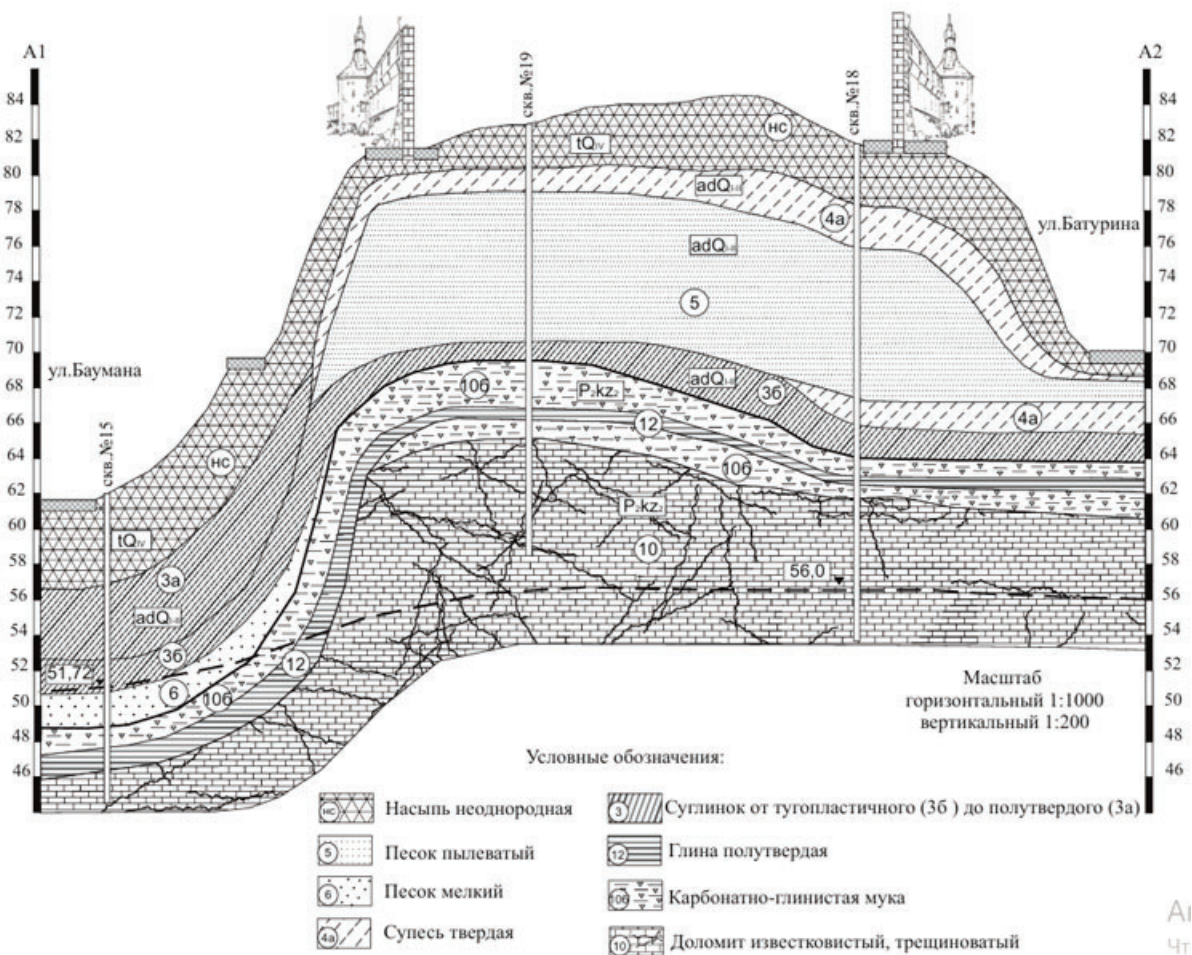


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез «Чернышевского хребтика»

В 2022 г в результате подмыва талыми водами была разрушена внешняя кладка Пятигранной башни, построенная в конце XVI – в начале XVII века.

Не менее интенсивно процессы деформации насыпных грунтов протекают и на выположенных склонах холма. Несмотря на сформированный угол естественного откоса, в грунтовой толще техногенных насыпей возникают срывы земельных масс с последующем перемещением их вниз по склонам. Причины схода оплывин и небольших оползней кроются в особенностях сложения тел насыпного грунта. В процессе выполаживания склонов укладка насыпных грунтов производилась не единомоментно, а частями, послойно, часто в различные периоды времени. Вследствие этого в грунтовой толще формируются отдельные слои, между которыми существуют более ослабленные структурные связи, по сравнению с внутрислоевыми. Впоследствии, при переувлажнении насыпных грунтов, между отдельными слоями снижается сила сцепления, в ослабленных зонах формируются трещины отрыва, разрывая верхний почвенно-растительный покров, призванный защитить глинистые грунты склона от размыва и оползания. Интересным фактом является то, что трещины отрыва возникают преимущественно в верхних частях боковых скатах холма, иногда непосредственно под бровкой склона. Далее процесс развивается стремительно. В трещины отрыва проникает дождевая или снеговая вода, которая по ослабленным плоскостям слоев насыпного грунта фильтруется вниз по склону. При этом вес грунтовых масс за счет насыщения водой в локальной области увеличивается, сила трения между глинистыми частичками снижается, что создает предпосылки для снижения устойчивости грунтовой толщи. Примером этого служат сходы оползней в западной части кремлевского холма, произошедшие летом 2024 г.

После выпадения обильных дождевых осадков здесь в верхней части склона создались предпосылки для активизации оползневых процессов. Около бровки склона возникли сопряженными между собой трещины отрыва в виде полуокружностей. Буквально через несколько часов они расширились и углубились, земляные связанные массы, отделенные от основного грунтового массива, приобрели некоторое отклонение от своего естественного залегания на склоне. Нару-

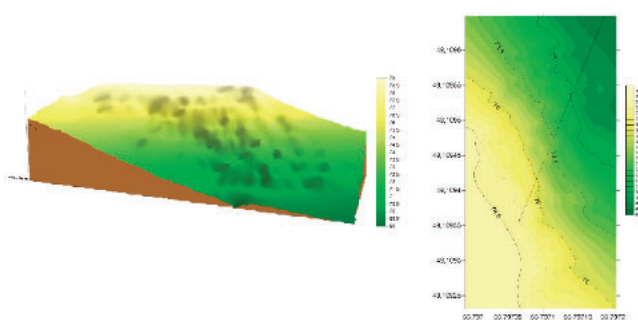


Рис. 3. Оползни на склонах Кремлевского холма по ул. Батурина, смоделированные в программе Google Earth и Surfer

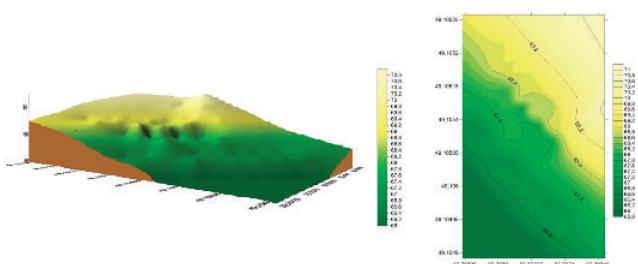


Рис. 4. Оползни на склонах Кремлевского холма по ул. Баумана, смоделированные в программе Google Earth и Surfer

шение первоначальных условий залегания и потеря в пределах участка развития оползневого тела структурной связи с окружающей грунтовой толщей привело к резкому обрушению земляных масс. Протяженность охвата склона оползневыми процессами составила около 10,0 м, длина врезающейся в склон оползневой выемки – 7,0-13,0 м при глубине – 2,5-3,0 м. По своим геометрическим параметрам и объемам перемещенного грунта оползни относятся к малым, неглубоким, поверхностным [3]. При смещении грунты оползневого тела не сохранили своих исходных особенностей залегания, образовав рыхлую, бесструктурную, влажную земляную массу, поверхность которой осложнена кочками холмисто-западинного микрорельефа. Это указывает на плохую связанность структурных элементов насыпного грунта в массиве, обусловленную его недостаточным уплотнением при укладке. В случае переувлажнения таких грунтов на склонах будут создаваться условия для вязко-пластичного перемещения земляных масс, чему в незначительной степени поспособствует высокое содержание в них глинистого материала. По способу образования оползни относятся к деляпсивным, по строению и особенностям положения поверхности скольжения – асеквентные. В их верхней части всегда формируется практически вертикальный уступ тылового шва.

На некоторых участках склонов Кремлевского холма оползневые процессы проявлены не столь ярко выражено. Смещение масс насыпного грунта осуществляется относительно медленно, в основном в периоды переувлажнения. При этом, как правило, не происходят разрывы поверхностного почвенно-растительного слоя. О наличии смещения грунтов можно судить по появлению на склонах гряд холмисто-валообразных проседаний травяного покрова. Более наглядно вялотекущие оползневые процессы фиксируются по разрушениям подпорных стенок в основании Кремлевского холма. В весенние периоды года насыпные грунты в нижней части склонов за счет аккумуляции в них вод атмосферных осадков утяжеляются. В результате этого давление на каменную кладку подпорных стен существенно усиливается. С течением времени боковое давление сползающих масс грунтов приводит к растрескиванию и наклонам отдельных участков подпорной стенки в сторону внешнего контура. Аварийные участки подпорных сооружений периодически подновляются, однако вязко-текучее смещение грунтов по склонам вновь приводит к их деформациям.

Учитывая вышесказанное можно сделать следующие выводы:

1. Кремлевский холм, на протяжении длительного периода времени подвергающийся внешнему воздействию, сопутствующему градостроительной деятельности человека, в настоящее время представляет собой антропогенно-трансформированный грунтовый массив.

2. В строении грунтового массива принимают участие как природные, так и насыпные искусственные грунты, постоянно находящиеся под влиянием внешних природно-техногенных факторов, способствующих их физико-химическим преобразованиям.

3. Взаимодействие инженерных сооружений архитектурного ансамбля музей-заповедника «Казанский Кремль» с геологической средой приводит к активизации негативных геодинамических процессов в многокомпонентной природной системе, таких как проседания грунтов и сход оползней.

4. Наиболее существенные деформации грунтовых толщ происходят в пределах склонов Кремлевского холма, что вызвано неоднородным строением и повышенными толщинами насыпных грунтов, их недостаточным уплотнением, способностью аккумулировать воды атмосферных осадков.

Литература

1. Ситдигов А.Г. Казанский кремль: история фортификации // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер.: Гуманитарные науки. 2010. Т.152. кн. 3. Ч.1. С. 97-106.
2. Хайрутдинов Р.Р., Кабирова А.Ш. Сохранить наше народное состояние: архитектурный ансамбль Казанского Кремля в 1940-1950-е гг. // Научный Татарстан. 2011. №2. С. 29-40.
3. Чалкова Ю.С., Черепанов Б.М. Оползневые процессы, их прогнозирование и борьба с ними // Ползуновский вестник. 2007. №1-2. С. 80-89.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ АРХИТЕКТУРНЫХ ПАМЯТНИКОВ

Н.А. Ларионова

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1
E-mail: nin.Larionowa@yandex.ru

В настоящее время проблема охраны и реставрации памятников архитектуры приобретает особую значимость в связи с необходимостью их сохранения как культурного достояния и наследия России. К памятникам относят усадьбы, здания и сооружения с исторически сложившимися территориями, памятники религиозного назначения (храмы, церкви, соборы и др.). Многие памятники за прошедшее время (200-300 лет) оказались в достаточно запущенном состоянии, и решение этой проблемы становится все более значимым.

Как отмечает Е.М. Пашкин, необходим комплексный подход к реставрации памятников, в том числе и учет влияния окружающей среды на сохранность исторических территорий. Динамичные и агрессивные изменения окружающей среды в последнее столетие представляют серьезную угрозу для устойчивости памятников архитектуры. Влияние естественных и техногенных факторов вызывает проявление негативных процессов, способствующих изменению состояния, структуры и несущей способности грунтовых массивов, являющихся причиной ухудшения общей устойчивости памятников [3, 4].

В результате строительной деятельности человека, активизируются негативные геологические и техногенные процессы, и многие архитектурные памятники теряют свою устойчивость. Это вызвано несколькими причинами: нарушением сбалансированного состояния исторических территорий; изношенностью (деструкцией) кладки конструкций памятника; изменением плотности грунтов оснований и ухудшением прочностных свойств фундаментов памятников. Поэтому при реставрации памятников необходимо уделять большое внимание не только несущим конструкциям (стены, своды, колонны), но и особенно грунтам основания, воспринимающих нагрузки от этих элементов, тем более что в последние десятилетия они наиболее активно подвергаются процессам техногенеза и гипергенеза [3, 4]. Поэтому необходимо проведение тщательных инженерно-геологических исследований состояния грунтов, фундаментов, стен и сводов для выявления причин, определяющих проявление деформаций и потерю устойчивости сооружения. Усиление несущих конструкций является одной из главных и приоритетных задач для повышения несущей способности грунтов оснований и предотвращению проявления последующих деформаций охраняемого памятника.

В результате воздействия геологических и техногенных факторов происходит активное изменение плотности грунтов оснований памятников. При строительстве различных сооружений на территории, примыкающей к месту расположения памятников, плотность изменяется в результате динамического воздействия. Подъем уровня подземных вод вызывает суффозию и вынос мелкозернистых частиц грунтов. Разуплотнение грунтов происходит за счет деструкции и разложения присутствующих органических включений в массиве. Часто это происходит за счет гниения деревянных свай, ранее используемых для усиления несущей способности фундаментов памятников. В результате этого процесса образуются полости и пустоты, что приводит к неоднородности массива, снижению плотности и несущей способности грунтов. Под устойчивостью памятника архитектуры следует понимать способность его основных несущих конструкций оказывать сопротивление усилиям, стремящимся вывести его из состояния статического равновесия, возникающих вследствие неравномерной осадки грунтов основания, деформаций фундаментов при их деструкции от агрессивности среды, действия динамических нагрузок [3, 4]. Поэтому выявление факторов, влияющих на общую устойчивость памятников, поиск, разработка и применение подходов и способов ее повышения является достаточно сложной и необходимой задачей по сохранению памятников архитектуры.

Для ликвидации и предупреждения неравномерных осадок грунтов оснований памятников многими организациями использовались физико-химические методы технической мелиорации. Для заполнения образовавшихся пустот, трещин и разуплотненных зон, выравнивания плотности грунта, его стабилизации, повышения несущей способности и деформационных характеристик, сни-

жения неоднородности состояния основания на некоторых объектах использовался цементно-глинистый раствор, способствующий уплотнению грунтов и исключающий условия проявления осадок зданий и сооружений. В качестве добавки к цементу использовалась бентонитовая глина в количестве 5,0-8,0% к весу цемента, обеспечивающая большую подвижность раствора.

Метод цементации грунтов оснований использовался для их укрепления и заполнения полостей (стаканов) от сгнивших деревянных свай. При этом снижается неоднородность структуры основания, повышается плотность грунтов, увеличиваются их прочностные и деформационные показатели. Цементация грунтов и заполнение пустот от сгнивших деревянных свай проводилась на многих памятниках.

В 1993 г. проведены работы по повышению несущей способности грунтов восстановленного в Москве на Красной площади Казанского собора, в основании которого сгнили оголовки, и частично на остаточной длине свай по их периметру [3, 4].

Такие же работы были проведены в 1994 г. в основании крепостных стен Новгородского детинца XV в., где массив характеризовался сложными инженерно-геологическими условиями, связанными с разнообразием свойств и параметров физического состояния подземных элементов основания (искусственная подсыпка грунта, армированная деревянными сваями, частично сгнившими и деформированными, образованием свайных пустот-стаканов) [2, 3, 4].

В 1997–1998 гг. работа по стабилизации неравномерных осадок основания в зоне контакта фундамент–грунт проводилась на аварийных объектах Толгского Свято-Введенского монастыря под Ярославлем. Цементно-глинистый раствор использовался для укрепления фундаментов и грунтов основания трапезной палаты и Крестовоздвиженской церкви, в которых произошло обрушение стен и сводов в результате неравномерных осадок при деструкции деревянных свай. Для устранения и ликвидации осадок здания трапезной палаты и храма по периметру фундаментов через наклонные скважины при небольшом давлении (0,4 МПа) было заинжецировано около 270 м³ цементно-глинистого раствора [3, 4].

По стабилизации осадок проведено укрепление грунта, представленного флювиогляциальными песками и супесями, в основании Теремного дворца Московского Кремля. В течение последних 200 лет в результате активного разложения деревянных свай и проведенных надстроек произошли неравномерные осадки, в результате которых в сводах и стенах здания образовались значительные трещины. В 1998 г. были проведены работы по укреплению фундаментов и стабилизации осадок обжатием грунта в зоне контакта фундамент–грунт. По периметру дворца, через пробуренные скважины заинжецировано 800 м³ цементно-глинистого раствора. Такая обработка фундамента и грунтов основания исключила дальнейшую деформацию сооружения [3].

Таким образом, метод цементации фундаментов и грунтов основания, благодаря совершенным технологическим процессам и положительным результатам, в настоящее время является одним из ведущих способов укрепления и улучшения несущих элементов памятников архитектуры.

В 1975 г. в основании фундаментов Успенского собора и церкви Ризположения, расположенных на территории Московского Кремля проведена предварительная цементация. Основанием фундаментов являлись разнозернистые (от пылеватых до гравелистых) неоднородно сложенные древне-аллювиальные пески. Причиной деформаций являлось образование полостей и разуплотненных зон в основании под подошвой фундаментов вследствие гниения деревянных свай. Для заполнения полостей и разуплотненных зон использовался цементно-глинистый раствор плотностью 1,65 г/см³ с распылом по конусу АЗНИИ 22,0-24,0 см [5].

Цементно-глинистый раствор, нагнетаемый при небольшом давлении (0,3 МПа), заполняя эти полости, раздвигает их стенки. Под давлением раствора диаметры полостей увеличивался от 3,0-5,0 см до 7,0-12,0 см, что дополнительно способствовало уплотнению грунтов основания. Для поддержания совместимости белого камня фундамента собора к цементному раствору добавлялась известь в количестве 1,0-2,0% от веса цемента [3].

Подобный раствор обладал высокой проникающей способностью, позволявшей при небольших давлениях (до 0,3 МПа) заполнить каверны, поры и трещины в бутовом белокаменном фундаменте. Прочность камня достигала 12,0-14,0 МПа, а модуль деформации увеличился в 1,3-1,4 раза [3, 5].

Для повышения устойчивости и прочности грунтов оснований использовался метод смолизации на основе карбамидной смолы марки КМ и щавелевой кислоты в качестве отвердителя. Грунт предварительно обрабатывался раствором щавелевой кислоты для повышения эффективности его стабилизации. В связи со сложными условиями инъецирование гелеобразующего раствора проводилось

по новой технологии с использованием горизонтального расположения инъекторов. Прочность укрепленного грунта изменялась от 0,95 до 6,3 МПа. Осадки фундаментов практически отсутствовали как при производстве работ, так и после их окончания [5].

Неравномерные осадки и деформации Воскресенского собора в Угличе, уникального памятника архитектуры XVII в. возникли в связи с сооружением ГЭС. Изменение уровня грунтовых вод способствовало вымыванию мелких фракций песчаных грунтов, залегающих в основании зданий и сооружений. Верхняя часть массива представлена насыпным грунтом мощностью 2,0 м с включением кирпича, бетона, обломков древесины и строительного мусора. Это предопределило использование комбинированного способа погружения инъекторов для ведения инъекционных работ [3, 4].

Для предотвращения дальнейших деформаций проводилось укрепление водонасыщенного песка методом смолизации с использованием растворов карбамидной смолы марки КМ и соляной кислоты. Для нейтрализации различных по составу включений, грунт предварительно обрабатывался раствором соляной кислоты. Под фундаментами создана плита из укрепленного грунта шириной 8,0 м (при ширине фундамента 2,5 м) и глубиной 4,0 м. Такая обработка позволила предотвратить проявление дальнейших деформаций собора. Следует отметить, что карбамидные смолы марок КМ отличаются повышенным содержанием формальдегида. Не вступивший в реакцию со смолой формальдегид, вымывается в поровый раствор грунтов, обеспечивая им антисептические свойства и предотвращая разложение органических включений в грунтах.

Большие по объему работы по укреплению грунтов и фундаментов на одном из памятников архитектуры на территории Московского Кремля проведены сотрудниками института НИИОСП. Низкая проницаемость грунтов исключила возможность использования двухрастворной силикатизации для их укрепления. Высокое содержание органических веществ в песчаных грунтах, залегающих под фундаментами памятника архитектуры, не позволило применять метод смолизации с использованием карбамидных смол. Поэтому для укрепления грунтов и устранения неравномерных осадок сооружения использовался метод однорастворной силикатизации на основе силиката натрия плотностью 1,30 г/см³ с добавлением отвердителя – кремнефтористоводородной кислоты (H₂SiF₆) плотностью 1,08 г/см³ [5].

При добавлении кислоты в раствор силиката натрия увеличивается силикатный модуль силиказоля, который коагулирует, образуя прочный объемный гель. При обычной температуре (18-20°C) время гелеобразования раствора составляет 30-40 минут, что осложняет проведение инъекционных работ. Поэтому для увеличения времени гелеобразования растворы предварительно охлаждали с помощью аммиачной установки до 8,0-10,0°C. В результате такой подготовки время гелеобразования увеличилось до 1,0-1,5 ч. Под фундаментами стен памятника из закрепленного грунта создана плита мощностью от 2,0 до 7,0 м. Общий объем закрепления составил около 13000 м³. Обработка грунта этим раствором обеспечило повышение прочности до 0,8-1,0 МПа и прекращение неравномерных осадок [5].

Следует отметить, что кремнефтористосиликатный раствор обладает определенными особенностями. Он может использоваться для укрепления грунтов с большим содержанием карбонатов и органических веществ, обеспечивая им высокую прочность 1,0-4,0 МПа. Кремнефтористоводородная кислота выполняет двойную роль. Она активно взаимодействует не только с раствором силиката натрия, образуя гель с высокой прочностью, но и реагирует с компонентами грунтов. В процессе взаимодействия H₂SiF₆ с карбонатами образуется нерастворимый фторид кальция (CaF₂), который выпадает в осадок, заполняет поры грунта и дополнительно его уплотняет.

Наряду с этим, при использовании кремнефтористоводородной рецептуры, кроме увеличения прочности грунтов, раствор обладает антисептическими свойствами. В поровые растворы укрепляемых грунтов выделяется фтор-ион. Он является активным антисептиком и предотвращает биохимическое разложение органических включений природного и антропогенного происхождения (скопления мусора, деревянные сваи, балки и т.п.), а также подавляет активность микроорганизмов, вызывающих негативные медико-биологические последствия [1].

В лаборатории «Исследование влияния геологических факторов на физико-химическое закрепление грунтов» в МГУ имени М.В. Ломоносова проведены лабораторные исследования по оценке возможности использования метода газовой силикатизации для укрепления грунтов оснований одного из памятников Московского Кремля. Насыпные грунты, отобранные в основании архитектурного памятника, представлены мелкозернистыми песками. Их коэффициент фильтрации в нарушенном сложении составлял 0,2-1,5 м/сут. Грунты отличались высоким содержанием карбонатов (15,6-27,8%) и органических веществ (4,37-15,38%).

Укрепление грунтов проводилось на лабораторной инъекционной установке. В грунты под давлением инъецировался раствор силиката натрия плотностью 1,27 г/см³, а затем проводилась обработка углекислым газом. После укрепления образцы испытывались на прочность при сжатии. Прочность образцов изменялась в пределах 0,80-1,00 МПа.

Как показали исследования, прямой зависимости показателей прочности укрепленных грунтов от количества органических веществ не установлено. Прочность зависит от дисперсности грунтов и содержания в их составе карбонатов. Относительно меньшими показателями прочности отличается грунт с большей проницаемостью (1,48 м/сут.). Это особенно проявляется при испытании водонасыщенных образцов (табл. 1).

| <i>Таблица 1</i> | | | | | | |
|--|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------|---------------|----------------|
| Изменение прочности грунтов, укрепленных методом газовой силикатизации, от их состава и проницаемости | | | | | | |
| К_ф, м/сут. | CaCO₃, % | С_{орг.}, % | Среда хранения образцов | | | |
| | | | воздушно-влажная | | Водная | |
| | | | 7 сут. | 14 сут. | 7 сут. | 14 сут. |
| 0,85 | 18,00 | 15,38 | 1,00 | 0,90 | 0,80 | 0,75 |
| 0,53 | 15,60 | 15,14 | 1,00 | 0,60 | 0,75 | 0,80 |
| 0,21 | 27,80 | 11,38 | 1,10 | 1,10 | 1,00 | 0,95 |
| 1,48 | 25,20 | 4,37 | 0,80 | 0,80 | 0,60 | 0,75 |
| 0,53 | 27,10 | 10,03 | 1,00 | 1,00 | 0,85 | 0,85 |

Определенное положительное влияние на процесс укрепления грунтов оказывают карбонаты, которые несколько нивелируют негативное влияние органики, и прочность образцов с увеличением их содержания повышается и составляет 1,0-1,10 МПа. Это обусловлено частичной растворимостью карбонатов в присутствии CO₂ с образованием Ca(HCO₃)₂, который вступает в реакцию с кремневокислым золем с формированием дополнительного количества известково-кремнеземистых соединений, упрочняющих грунт. Но гумусовые пленки на частицах грунта, в том числе и на карбонатах, тормозят развитие этого процесса. Поэтому прочность укрепленных грунтов не достигает своего максимального значения. На основании проведенных исследований следует рекомендовать метод газовой силикатизации для укрепления грунтов оснований архитектурных памятников.

Таким образом, анализ имеющейся информации показывает, что физико-химические методы достаточно эффективны и могут использоваться при проведении работ по сохранению памятников архитектуры. При этом инженерно-геологические исследования должны выявить условия проявления их деформаций. Необходимы сведения по однородности массива, наличия пустот, каверн и разуплотненных зон, а также о составе и свойствах грунтов оснований. Именно на этих показателях проводится выбор физико-химических методов, наиболее рациональных и эффективных для данных условий, способствующих уплотнению и упрочнению грунтов, обеспечивающих повышение несущей способности и устранения неравномерных осадок.

Литература

1. Воронкевич С.Д. Основы технической мелиорации грунтов. – М. Научный мир, 2005. 504 с.
2. Пашкин Е.М. Изучение отражения взаимодействий элементов исторических систем при диагностике деформаций памятников архитектуры // Геоэкология, № 4, 2010. – С. 371-377.
3. Пашкин Е.М. Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры. – СПб. Геореконструкция, 2013. – 333 с.
4. Пашкин Е.М. Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры. Издание 3-е, дополненное. – М.: ОАО Издательство «Высшая школа», 2018. – 336 с.
5. Ржаницын Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. – М.: Стройиздат, 1986. – 264 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ОСНОВАНИЙ АРХИТЕКТУРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

А.А. Матюшенко, А.А. Иванов

МГРИ им. С. Орджоникидзе, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23
E-mail: anyamatyshenko@rambler.ru

В настоящее время остро стоит вопрос о сохранении массивов грунтов оснований архитектурных сооружений. Для этого необходимо выявлять зоны разуплотнения, обводнения и зоны технических коммуникаций. Решить эту задачу можно с помощью геофизических методов [2]. Они позволяют не только отслеживать текущее состояние, но и контролировать изменение состояний грунтов.

Перспективным методом для обследования массивов грунтов является георадиолокация. Георадиолокация имеет ряд преимуществ: обладает наибольшей разрешающей способностью при изучении верхней части разреза, имеет высокую скорость исследования, хорошую помехозащищенность, является бесконтактным, неразрушающим методом исследований [1].

Метод георадиолокации основан на явлении отражения электромагнитной волны от границ сред с разными электрическими свойствами – электропроводностью и диэлектрической проницаемостью [5]. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между сухими и влагонасыщенными грунтами, контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и тальми грунтами, между коренными и осадочными породами [4].

Несколько примеров использования метода георадиолокации при обследовании грунтов оснований архитектурных сооружений представлено ниже.

При обследовании основания памятника целью являлось определение строения верхней части разреза, наличия в грунте локальных объектов с указанием их положения в плане и по глубине; выяснение возможных причин деформации облицовочных плит вокруг основания памятника [3].

По результатам проведения георадиолокации по площадке вокруг памятника удалось выделить некоторые локальные объекты, слои и области с просадками грунта. Радарограмма представлена на рисунке 1.

В результате выполненных работ удалось узнать, что памятник установлен на участке значительного увеличения мощности насыпного грунта. В непосредственной близости от памятника выделено несколько линий коммуникаций. Практически все «просадки», зафиксированные в верхнем слое, приурочены к областям нарушенного грунта в слое насыпного (техногенного) грунта. Слой характеризуется неоднородным строением, отсутствием протяженных осей синфазности, большим количеством различных объектов (строительного мусора, коммуникаций). В верхней части слой имеет преимущественно песчаный состав, а с глубиной возрастает глинистость.

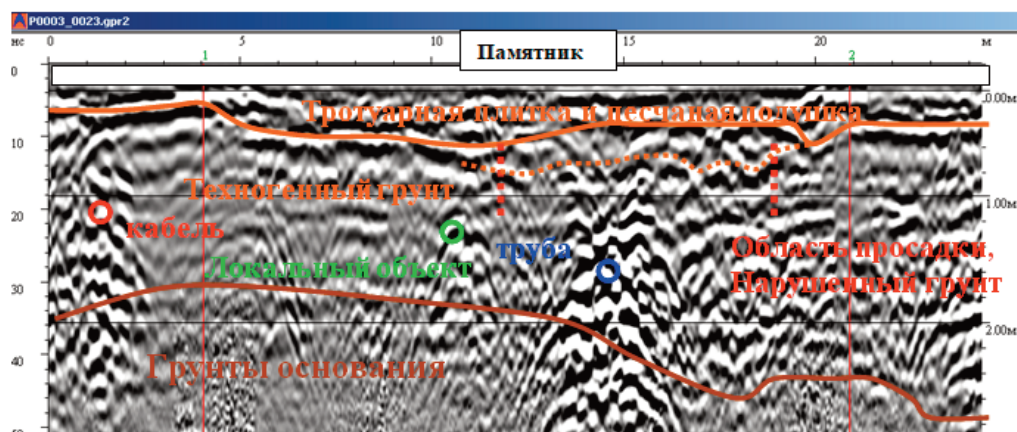


Рис. 1. Радарограмма с выделенными объектами и слоями

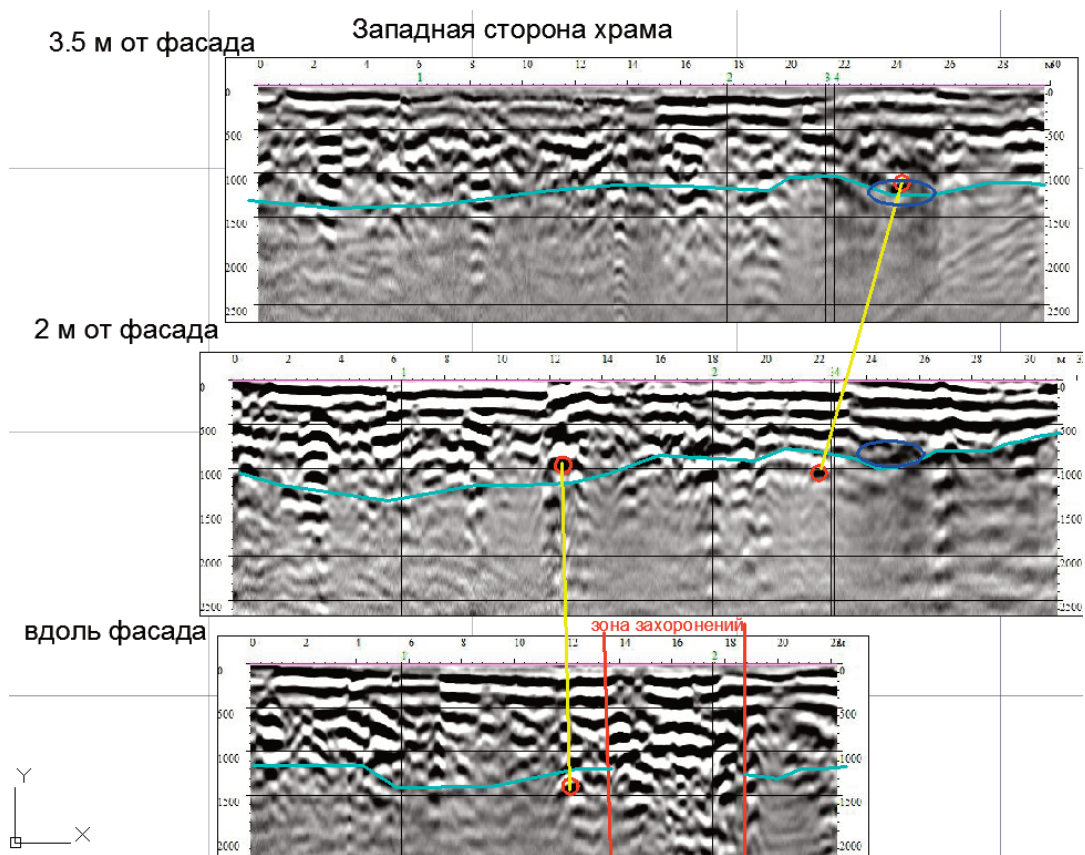


Рис. 2. Радарограмма с выделенными объектами

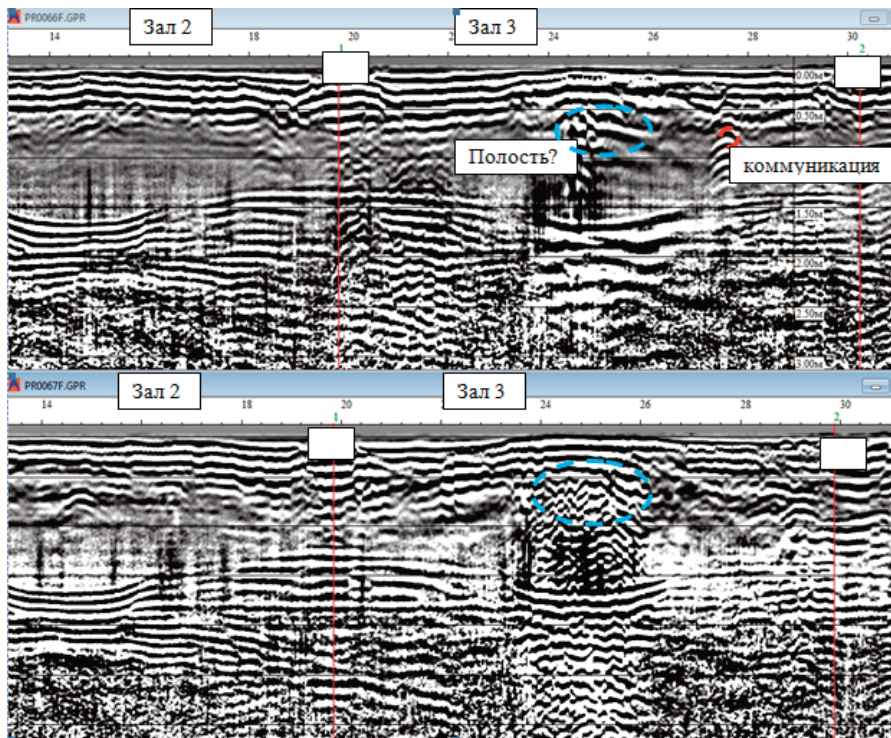


Рис. 3. Радарограмма с выделенными объектами

Обследование грунтов основания Храма было проведено с целью выделения зоны влагонасыщенных грунтов, зоны технических коммуникаций, мест захоронения

По результатам исследования на радарограмме (Рисунок 2) удалось выделить локальную зону переувлажненных грунтов на северо-западном углу здания.

На радарограмме обозначена зона захоронений и положение проложенных коммуникаций. Вдоль западной стороны отмечено наличие значительно неоднородных грунтов на глубину более 2-х метров, преимущественно супесчаного состава [7].

Третий пример использования метода георадиолокации при обследовании основания массива под Храмом с целью поиска подвальных помещений под полами здания и определения их границ. Радарограмма представлена на рисунке 3.

На радарограмме удалось выделить коммуникации, а также некоторую полость, которую в итоге сложно назвать подвальным помещением. По результатам исследований под полом Храма были обнаружены несколько участков с потенциальными пустотами под существующим перекрытием, а также технические коммуникации [6].

Выводы

Рассмотрев все три примера использования метода георадиолокации для изучения строения массивов грунтов под архитектурными сооружениями можно сделать вывод о том, что данный метод информативен, точен, а также прост в проведении работ.

В результате проведенных работ, удалось выполнить поставленные задачи, определить места водонасыщения, зоны пустот и провалов, расположение коммуникаций различного типа, позволило определить диэлектрические характеристики грунтов, участвующих в строении разреза и провести достоверную интерпретацию полученных материалов.

Литература

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию: Учебное пособие. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. — 153 с
2. Владов М.Л., Старовойтов А.В., Калашиников А.Ю. Некоторые вопросы интерпретации георадиолокационных данных при изучении железнодорожных насыпей // Разведка и охрана недр. 2005. 2. 15-18.
3. Матюшенко А.А., Иванов А.А. Определение толщины верхних слоёв искусственного покрытия автодорог методом георадиолокации на примере Екатеринбурга // Разведочная геофизика и геоинформатика: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 18–19 марта 2020 года. – Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2020. – С. 47-49.
4. Матюшенко А. А., Кудина Я. О., Посеренин А. И., Иванов А. А. Опыт применения метода георадиолокации для определения конструкции дорожной насыпи // Молодые - Научкам о Земле: Материалы IX Международной научной конференции молодых ученых. В 7-ми томах, Москва, 23 октября 2020 года / Том 4. – Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2020. – С. 285-287.
5. Огильви А.А. - Основы инженерной геофизики. – М.: Изд-во «Недра», 1990 г.
6. Matyushenko A. A., Ivanov A. A., Poserenin A. I., Deconvolution of ground penetrating radar data in the study of highways / 7th Scientific Exploration Conference - Tyumen 2021: Natural Resources Management as a Cross-Functional Process: 7, Natural Resources Management as a Cross-Functional Process, Tyumen, 22–26 марта 2021 года. – Tyumen, 2021. – DOI 10.3997/2214-4609.202150083. – EDN SZLDXH.

КАРБОНАТНЫЕ ПОРОДЫ ВЕРХНЕГО ДЕВОНА КАК ГЛАВНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ ОБЪЕКТОВ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ПСКОВА

Л.П. Норова, М.Г. Цинкобурова, М.Л. Барановская

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия. д.2
E-mail: rectorat@spmi.ru

Псков расположен на северо-западе Русской плиты, в области развития глинисто-терригенно-карбонатных пород верхнего девона. При этом территория средневекового Пскова приходится на зону распространения карбонатной толщи нижнего франа, перекрытой маломощным чехлом четвертичных отложений. Это, а также положение средневекового Пскова на периферии русских земель, требовавшее строительства мощной системы оборонительных укреплений, привело к беспрецедентному не только в средневековой Руси, но и в Европе развитию каменного строительства. Предположительно уже в начале XIV в. в Пскове появляются первые каменные оборонительные сооружения, а к началу XVI в. система защитных укреплений Пскова не имела аналогов ни в Восточной, ни в Западной Европе. Именно так вспоминает Псков того времени Станислав Пиотровский, секретарь великого князя литовского Стефана Батория, вторгшегося летом 1581 г. на Псковские земли: «Любуемся Псковом. Господи, какой большой город! Точно Париж! Помоги нам Боже с ним справиться...» [2, с. 92]. Попутно с фортификационными сооружениями столь же активно каменный материал начинает использоваться в культовом зодчестве средневекового Пскова, в меньшей степени – в гражданской архитектуре. Сложная история древнего города, включая Петровские реформы, характеризовавшиеся уничтожением целой серии средневековых укреплений, варварское отношение к шедеврам средневековой архитектуры в VIII и XIX вв., а главное – две оккупации, пережитые Псковом в XX в. привело к значительной утрате уникального историко-культурного наследия. Разрушение крепостных стен и башен требует их реставрации с использованием аутентичного местного строительного материала. Проблему установления его происхождения могут решить комплексные литолого-стратиграфические и инженерно-геологические исследования. Выявление оригинального строительного материала и его особенностей позволит усовершенствовать рекомендации, необходимые для подбора аналогичных сортов плитняка из карбонатных толщ нижнего и среднего франа при проведении реставрационных работ для сохранения внешнего вида памятников архитектуры в максимальной степени подобия. Авторы рекогносцировочно изучили особенности использования карбонатных пород в крепостной архитектуре и некоторых объектах культового зодчества Пскова.

Сотрудниками Псковского университета была сделана реконструкция первоначального рельефа территории Пскова в черте Окольного города, согласно которой (с учетом мощности культурного слоя до 8–10 м.) первоначальный рельеф оказался полностью погребенным [4]. Рельеф Пскова до развития активной застройки и изменения первоначальных ландшафтов представлял ступенчатое плато, ограниченное палеоврезами рек Великой и Псковы, каждая ступень характеризовалась своей системой природопользования [4].

Согласно летописным данным [5] в эпоху средневековья ломка плиты, идущей на строительные нужды Пскова, осуществлялась в непосредственной близости от строящихся крепостных стен, как на правом берегу р. Великой (выше и ниже по течению от Псковского Крома), так и в Завеличье. Добыча традиционно велась путем отламывания плит в береговых обрывах Псковы и Великой. В местах старинных плитных ломок можно наблюдать изменение характера долины р. Великой от привычного для среднего и нижнего течения реки каньонообразного до корытообразного, формирование участков реки с сильно расширенной поймой. К одному из таких мест бывших ломок, например, приурочен современный Городской пляж Пскова (рис. 1).

Породы девона залегают моноклинально с падением в 1–2 градуса на юго-юго-восток. Системой тектонических трещин с доминирующими азимутами СЗ – 300–330 и СВ – 30–60 градусов карбонатное плато разбито на серию карбонатных массивов [4]. С литолого-фациальной точки зрения



Рис. 1. Изменение морфологии речной долины р. Великой в районе Мирожского монастыря

карбонатные породы нижнего франа на территории и в окрестностях Пскова представляют собой осадки, сформировавшиеся в мелководной части эпиконтинентального морского бассейна, характеризовавшегося многочисленными разноамплитудными трансгрессивно-регрессивными колебаниями. В результате этого была сформирована ритмичная (с разнопорядковыми ритмами) глинисто-карбонатная толща.

В изучении пород девона северо-запада Русской плиты принимали участие выдающиеся отечественные стратиграфы, литологи и палеонтологи — П.Н. Венюков, Р.Ф. Геккер, Д.В. Обручев, В.С. Сорокин. Это позволило создать уникальную по степени детальности схему расчленения пород среднего и верхнего девона. Однако резкие фациальные изменения отложений, установленная диахронность границ многих стратонов, определяемых как на биостратиграфической, так и на литологической основе, в конце XX в. привели к выделению местных стратонов в большем стратиграфическом объеме, чем субрегиональные стратиграфические подразделения (табл. 1, [1,3]).

| <i>Таблица 1</i> | | |
|--|--|----------------|
| Региональные, субрегиональные и местные стратиграфические подразделения нижнего франа окрестностей Пскова | | |
| Горизонт | Слой с географическим названием | Свита |
| Дубниковский | Дубниковские | Староизборская |
| Плявинский | Чудовские | |
| | Псковские | |
| | Снеогогорские | |

Карбонатные породы, которые использовались древними каменотесами Пскова, относятся к нижней части староизборской свиты, псковским слоям. Псковское время соответствовало первой половине самой крупной франской трансгрессии. На территории современного Пскова в это время была обстановка забарового бассейна, с отложениями которого связаны слои микритовых известняков, переслаивающихся с известковистыми глинами и алевритистыми известняками. При усилении регрессии нарушалась соленость морского бассейна, что приводило в обстановке мелководья к формированию водорослевых и строматопоро-водорослевых банок, с которыми связаны слои онколитовых и строматопоро-онколитовых известняков. В моменты наиболее сильных трансгрессивных эпизодов условия сменялись на мелководный открытый шельф с интенсивной волновой динамикой. С этими обстановками связано формирование «шламовых» известняков, брахиоподовых ракушняков, криноидных, криноидно-брахиоподовых известняков. Почти все известняки псковских слоев характеризуются различной степенью доломитизации, неравномерно проявленной по простиранию карбонатной толщи. Указанные разности пород ритмично чередуются в обнажениях псковских слоев, наблюдаемых и в настоящее время на отдельных участках в береговых обрывах Великой и Псковы.

В процессе рекогносцировочных исследований авторы смогли выявить различные литологические типы известняков псковских слоев в объектах средневекового зодчества Пскова. Широко распространенным литотипом псковских слоев являются известняки (разной степени доломитизации) со следами сильной биотурбации. Такие разности известняков были встречены авторами повсеместно — в стенах Окольного города, в стенах Псковского Крома, в фундаментах церкви Окольного города, в облицовке многих церквей Пскова (рис. 2). Эта разность известняков является достаточно широко распространенным литотипом известняков верхней части псковских слоев, встречающимся в верхах береговых обрывов реки Великой. Также к широко распространенным в постройках средневекового Пскова разностям псковских слоев относятся микритовые сильно доломитизированные известняки с умеренной биотурбацией (рис. 3), криноидные известняки. Достаточно часто встречается и использование онколитовых и строматопоро-онколитовых известняков и «шламовых» известняков.



Рис. 2а. Внешний вид церкви Спаса Нерукотворного



Рис. 2б. Микритовые слабо доломитизированные известняки с характерными следами илоедов типа *Balanoglossites* в облицовке стен церкви Спаса Нерукотворного

Все вышеуказанные разности известняков характеризуются высокой степенью прочности и их применение закономерно в качестве и облицовочного и бутового камня.



Рис. 3а. Общий вид Гремячей башни



Рис. 3б. Сильно доломитизированные микритовые известняки с детритом криноидей и редкими ходами илоедов в облицовке Гремячей башни

Однако авторами были зафиксированы случаи использования менее крепких разностей известняков — алевритистых известняков, брахиоподовых ракушняков. Интересная находка была обнаружена в облицовке Михайловской башни Окольного города (рис. 4). Возможно в силу ускоренных сроков возведения защитных стен, средневековые строители использовали здесь в облицовке целые отломанные плиты, характеризующиеся чередованием различных разностей известняков, переслаивающихся с известковистыми глинами.



Рис. 4а. Общий вид Михайловской башни



Рис. 4б. Микритовые сильно биотурбированные известняки с прослоями известковистых глин в облицовке Михайловской башни

Полученные данные наглядно отражают особенности каменного строительства средневекового Пскова и являются любопытной информацией для историко-географических исследований. Не менее важным оказывается осмысленный подбор литотипов известняков при проведении реставрационных работ, отвечающий инженерно-геологическим критериям и максимально соответствующий оригинальному материалу. Как было отмечено выше, за свою долгую и сложную историю архитектурное наследие древнего Пскова оказалось сильно разрушено (рис. 5). Только в конце XIX в. начались первые реставрационные работы, часто проводившиеся даже без попыток воссоздания первоначального облика сооружений. Так возникла оригинальная, но не соответствующая первоначальной архитектуре Псковского кремля Довмонта (Смердя) башня. В это время при строительстве использовался местный материал из псковских слоев окрестностей Пскова, что хорошо видно по воссозданным стенам Захаба Псковского кремля, облицованным легко узнаваемыми микритовыми известняками со следами *Balanoglossites*. В современных реконструкциях часто используется привозной материал, в частности известняки порховских слоев среднего франа, отличающиеся от местных разностей по цвету и характеру биотурбации (рис. 6).



Рис. 5. Вид на Кремль до восстановительных работ, предположительно начало XX в. <http://informpskov.ru/>



Рис. 6. Внешний вид свежо отреставрированной (реставрация 2017–2019 гг) Варламовской башни

Проведенные авторами рекогносцировочные исследования характера карбонатных пород в средневековых постройках Пскова позволили выявить следующие особенности:

- были подтверждены свидетельства о добыче каменного материала почти в пределах городской черты средневекового Пскова;
- в качестве строительного материала использовались известняки и доломитизированные известняки псковских слоев нижнего франа девонской системы;

- выбор строительного материала часто носил «случайный» характер, что подтверждается обнаружением авторами в качестве облицовочного и бутового материала менее крепких разновидностей псковских известняков — ракушнякав, алевролитистых известняков.

Литература

1. *Вербицкий В.Р., Заррина Е.П., Журавлев А.В., и др. Отчет о научно-исследовательской работе по объекту «Стратиграфический» № 29-95-12/1. Составление и обновление местных стратиграфических схем среднефранского подъяруса девона Главного девонского поля, плейстоцена и голоцена Северо-Запада Русской плиты. (Тема N 611-д ВСЕГЕИ). Санкт-Петербург. 1999.*
2. *Дневник последнего похода Стефана Батория на Россию. (Осада Пскова): с двумя рисунками / издание Псковского Археологического Общества; перевод с польского действительного члена Псковского Археологического Общества О.Н. Милевского. Псков: Типография Губернского Правления, 1882. 261 с.*
3. *Легенда Ильменской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 (изд. 2-е) / под ред. В.П. Кирикова. ГП ПКГЭ, 1999. 510 с.*
4. *Татарников О.М., Яковлева Е.А. Природные условия территории Пскова на начальном этапе развития города // Вестник Псковского государственного университета. Выпуск 2. 2013, с. 107–114.*
5. *Цвылев С.А. «Самородный камень» в зодчестве древнего Пскова. Псков: ГБУК «Псковская областная универсальная научная библиотека», 2015. 60 с.*

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| <i>Введение</i> | 5 |
| <i>Гошовец С.В.</i> О работе Федерального дорожного агентства по адаптации дорожной деятельности к изменениям климата на федеральных автомобильных дорогах, проходящих по территории распространения многолетнемерзлых грунтов в пределах криолитозоны | 6 |
| <i>Трофимов В.Т.</i> О массивах грунтов и их жизнеобеспечивающих функциях | 10 |

СЕКЦИЯ 1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ С ОБЪЕКТАМИ ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

| | |
|--|----|
| <i>Бабуркин И.А., Крячков И.В.</i> Определение влияния железнодорожного транспорта на насыпной массив на примере Амурской области с использованием метода подповерхностного радиолокационного зондирования | 16 |
| <i>Барановский А.Г.</i> Оценка изменчивости физико-механических свойств грунтов в процессе эксплуатации зданий и сооружений | 20 |
| <i>Галкин А.Н., Красовская И.А., Павловский А.И.</i> Опыт создания и использования техногенных грунтов в качестве оснований и среды для различных инженерных сооружений в условиях Белоруссии | 25 |
| <i>Коробов М.В., Аникеев А.В.</i> Определение расчетных показателей физико-механических свойств массивов растворимых скальных грунтов по данным полевых и лабораторных работх | 30 |
| <i>Кутергин В.Н., Фролов С.И.</i> Оценка слоистых грунтовых толщ как природных композитных материалов | 36 |
| <i>Овечкина О.Н., Фуникова В.В., Тверяков А.В.</i> Массивы элювиальных грунтов как основания зданий высотной конструкции (Екатеринбург) | 41 |
| <i>Ракитина Н.Н., Жидков Р.Ю., Буфеев Ф.К.</i> Актуальный взгляд на возможность использования материалов инженерно-геологических изысканий прошлых лет для оценки массивов грунтов на примере участка в г.Москве | 46 |
| <i>Смирнов А.И.</i> Взаимодействие карстового массива с железной дорогой на Уфимском карстовом косогоре в 1888–2024 гг. | 50 |
| <i>Строкова Л.А.</i> Техногенные грунты г. Томска | 55 |
| <i>Фролова Ю.В., Долгов В.А., Пиоро Е.В.</i> Оценка физико-механических свойств массива карбонатных пород с помощью модели Хоэка-Брауна | 59 |

СЕКЦИЯ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ И РАЗВИВАЮЩИХСЯ В НИХ ПРОЦЕССОВ

| | |
|---|----|
| <i>Булатников М.А., Мирный А.Ю.</i> Проблемы изучения массивов крупнообломочных грунтов | 64 |
| <i>Волков Н.Г., Соколов И.С.</i> Применимость статического зондирования в массивах мерзлых грунтов на практике | 69 |
| <i>Горлов А.А., Фоменко И.К.</i> Влияние модели грунта на результаты расчёта конечной осадки основания фундамента мелкого заложения | 75 |
| <i>Дробинина Е.В., Белкин П.А.</i> Моделирование как средство ретроспективного анализа геоэкологических процессов в пределах техногенного объекта | 80 |
| <i>Жидков Р.Ю., Романова Е.Р., Абакумова Н.В., Савченко Д.С., Буфеев Ф.К.</i> Методы дистанционного зондирования Земли как инструмент регионального мониторинга массивов грунтов | 84 |
| <i>Зарницын Г.А., Самарцев В.Н.</i> Анализ неопределенности величины прогнозного водопритока в карьер, вызванный неоднородностью фильтрационных свойств массива грунтов золоторудного месторождения с помощью моделирования | 89 |

| | |
|--|-----|
| <i>Зеркаль О.В., Фоменко И.К., Фролова Ю.В.</i> Классификация массивов скальных грунтов как инструмент изучения и оценки их поведения | 94 |
| <i>Идармачев Ш.Г.</i> Деформационный режим крупной трещины на известняковом плато Восточного Кавказа | 99 |
| <i>Крячков И.В., Бабуркин И.А.</i> Сейсмическое микрорайонирование в арйонах с высокой сейсмической опасностью на примере населенного пункта «Лазаревское» | 103 |
| <i>Матвеев В.В., Шанина В.В.</i> Оценка параметров переуплотнения глинистых грунтов по корреляционным зависимостям как инструмент изучения массивов дисперсных грунтов . . . | 109 |
| <i>Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю., Смирнов А.Ю.</i> Изучение техногенных грунтов с использованием физико-химического моделирования (на примере Левихинского рудника, Свердловская область) | 114 |
| <i>Свалова В.Б.</i> Моделирование клиноформ осадочного чехла | 119 |
| <i>Шиманов А.А.</i> Опыт использования данных режимных наблюдений как временного ряда для прогнозирования уровня подземных вод | 124 |

СЕКЦИЯ 3. ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ПОВЕДЕНИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

| | |
|--|-----|
| <i>Абакумова Н.В., Романова Е.Р.</i> Каменоломни новой Москвы и их роль в техногенной трансформации массивов грунтов | 128 |
| <i>Барыкина О.С., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Пензев А.П., Новиков П.Н.</i> Массивы гранитоидов Северо-Восточного Забайкалья и процессы, в них протекающие | 133 |
| <i>Батурин В.И., Шиманов А.А., Егоров Ф.Б.</i> Устройство системы мониторинга оползневой активности на Воробьевых горах в городе Москва | 137 |
| <i>Дзагания Е.В., Дзагания Л.М., Крыленко В.И.</i> Оценка показателя опасности для морских лагунных берегов в зонах подводных каньонов на черноморском побережье Кавказа | 141 |
| <i>Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В.</i> Энергетические характеристики оползневого массива при смещении | 146 |
| <i>Кучуков М.М., Казеев А.И., Орлова Н.А., Постоев Г.П.</i> Катастрофическая активизация оползневого процесса на участке автодороги М-7 «Волга» | 150 |
| <i>Новиков П.В., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н.</i> Типизация массивов грунтов в долине р. Москвы по условиям развития оползневых процессов | 154 |
| <i>Поспехов Г.Б., Изотова В.А.</i> Инженерно-геологическое обеспечение формирования техногенных массивов гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты | 158 |
| <i>Хазраткулзода Лукмонишох</i> Характеристика просадочности лессовых грунтов верхнечетвертичного душанбинского комплекса территории г. Вахдат | 160 |

СЕКЦИЯ 4. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ

| | |
|---|-----|
| <i>Григорьева И.Ю., Морозов А.В., Садов С.С.</i> Экологическая оценка состояния нефтезагрязненных массивов песчаных грунтов методами биодиагностики | 165 |
| <i>Злобина В.Л., Медовар Ю.А., Юшманов И.О.</i> Полигоны твердых коммунальных отходов как один из источников формирования техногенных грунтов | 170 |
| <i>Кайгородов Е.И., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Кулаков А.П.</i> Определение длины диффузии радона в массивах глинистых грунтов | 174 |
| <i>Королев В.А., Трофимов В.Т., Галкин А.Н.</i> Литотипы как жизнеобеспечивающий ресурс эколого-геологических систем | 178 |
| <i>Костикова И.А., Галицкая И.В., Старостин Е.А.</i> Изучение взаимодействия в системах вода-грунт на участках расположения полигонов ТКО с использованием физико-химического моделирования | 182 |

| | |
|--|-----|
| <i>Максимович Н.Г., Мизев А.А., Березина О.А., Мещерякова О.Ю., Китаева И.В., Деменев А.Д., Барышников А.Н.</i> Динамика изливов кислых шахтных вод угленосного массива после прекращения его разработки | 187 |
| <i>Мочалов В.Ф.</i> Идентификация фактов неблагоприятного воздействия на окружающую среду вблизи железной дороги на основе обработки материалов космической съёмки | 192 |
| <i>Наход В.А., Малов А.И., Данилов К.Б., Горелик Г.Д.</i> Анализ воздействия деятельности горнодобывающего предприятия на уникальные формы рельефа | 196 |
| <i>Рыбников П.А., Рыбникова Л.С., Галин А.Н.</i> Экологические аспекты исследования грунтов отвалов Левихинского рудника (Свердловская область) | 201 |
| <i>Свалова В.Б.</i> Гидротермальные системы Кавказа и геотермальная энергетика в России | 206 |
| <i>Толкачев Г.Ю.</i> Оценка выноса тяжёлых металлов из донных отложений водных объектов | 212 |
| <i>Трофимов В.Т.</i> Экологические аспекты изучения массивов грунтов | 217 |
| <i>Харькина М.А., Андреева Т.В.</i> Массивы карбонатных биолитов как жизнеобеспечивающий ресурс эколого-геологических систем (на примере известняков Крыма и писчего мела центральных районов Русской плиты) | 225 |

СЕКЦИЯ 5. ВОПРОСЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СООРУЖЕНИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С МАССИВАМИ ГРУНТОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

| | |
|---|-----|
| <i>Алёхин С.В., Андреев А.В., Быстров Н.В., Кирип П.В.</i> Особенности организации мониторинга на федеральных автомобильных дорогах в криолитозоне | 228 |
| <i>Баширова И.А., Гиллих С.Н., Ефименко В.Н., Ефименко С.В., Чурилин В.С.</i> Результаты дорожно-климатического районирования территории Ямало-Ненецкого автономного округа | 233 |
| <i>Викторов А.С., Орлов Т.В., Капралова В.Н., Архипова М.В., Бондарь В.В., Гонников Т.В., Зверев А.В., Сергеев Д.О., Хименков А.Н., Кулаков А.П.</i> Использование дистанционных методов при ландшафтно-геокриологическом районировании применительно к эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне | 238 |
| <i>Сыромятников И.И., Литовко А.В., Железняк М.Н.</i> Особенности инженерно-геокриологических условий автомобильной дороги «Амга» в Республике Саха (Якутия) | 242 |
| <i>Типенко Г.С., Сергеев Д.О., Хименков А.Н., Мерзляков В.П., Кулаков А.П., Дернова Е.О., Савченко Д.С.</i> К прогнозу состояния мерзлоты в зоне влияния дорожной насыпи (на примере участка автомобильной дороги «Амур») | 247 |

СЕКЦИЯ 6. СОХРАНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ ИСТОРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ЗАКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ

| | |
|---|-----|
| <i>Аверин И.В.</i> Особенности инженерно-геологических условий территории Псково-Печерского монастыря и их влияние на сохранность сооружений | 253 |
| <i>Буфеев Ф.К., Бревнов Ю.В., Жидков Р.Ю., Орловский А.А., Рекун В.С.</i> Специальное инженерно-геологическое районирование исторического центра Москвы для оценки влияния гидрогеологических условий на состояние памятников архитектуры | 259 |
| <i>Гараева А.Н., Латыпов А.И., Королев Э.А., Зарипова Д.Р.</i> Изучение состояния массивов исторических памятников на примере ансамбля Казанский Кремль | 263 |
| <i>Ларионова Н.А.</i> Использование физико-химических методов для укрепления грунтов оснований архитектурных памятников | 268 |
| <i>Матюшенко А.А., Иванов А.А.</i> Применение метода георадиолокации при обследовании оснований архитектурных сооружений | 272 |
| <i>Норова Л.П., Цинкобурова М.Г., Барановская М.Л.</i> Карбонатные породы верхнего девона как главный строительный материал объектов историко-культурного наследия Пскова | 275 |