Научный совет РАН по криологии Земли

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

Институт криосферы Земли СО РАН

Ассоциация геокриологов России

«Проблемы криосферы Земли»

Сборник тезисов

Пущино, Россия, 12-16 мая, 2025

ISBN 978-5-6073423-4-3

Программный комитет

Председатель - Железняк М.Н., чл.-корр. РАН, директор ИМЗ СО РАН

Со-председатель - Алексеев А.О., чл.-корр. РАН, директор ИФХиБПП РАН

Со-председатель - Дроздов Д.С., д.г.-м.н., зам. дир. ИКЗ ТюмНЦ СО РАН

Со-председатель - Абрамов А.А., к.г.-м.н., зав. отд. криогенных почв

ИФХиБПП РАН

Лупачев А.В., к.б.н., с.н.с. ИФХиБПП РАН

Ривкин Ф.М., д.г-м.н, г.н.с., ИКЗ ТюмНЦ СО РАН

Организационно-технический комитет

Абрамов А.А., к.г.-м.н., зав. отд. ИФХиБПП РАН

Лупачев А.В., к.б.н., с.н.с. ИФХиБПП РАН

Куть А.А., к.г.-м.н., уч. секретарь ИМЗ СО РАН

Ривкин Ф.М., д.г-м.н, г.н.с., ИКЗ ТюмНЦ СО РАН

Христофоров И.И., к.т.н., в.н.с., ИМЗ СО РАН

Гинзбург А.П., асп., и.о. м.н.с. ИФХиБПП РАН

Винокурова Т.А., к.т.н., м.н.с. ИМЗ СО РАН

Чудинова С.М., к.б.н., н.с. ИФХиБПП РАН

Партнеры конференции

ООО НТЦ «Симмэйкерс» https://simmakers.ru/ +7 (495) 772-54-07

ООО «Северные изыскания» https://sev-iz.ru/ +7 (499) 455-54-42

ООО “КриоЛаб” https://kriolab.ru/ +7(499)302-33-45

АО «НПП «Эталон» https://omsketalon.ru/ +7 (3812) 36-79-18

При содействии главы города и администрации Городского округа Серпухов, Комитета по образованию администрации Городского округа Серпухов.

Содержание

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ 3–16

ПРИВЕТСТВЕННЫЕ ДОКЛАДЫ 17–21

ОБЩАЯ, РЕГИОНАЛЬНАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОКРИОЛОГИЯ 22–56

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ…… 57–101

ИНЖЕНЕРНОЕ МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ.

УСТОЙЧИВОСТЬ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ 102–146

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ 147–186

ПОДЗЕМНЫЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ КРИОЛИТОЗОНЫ.

ЛЕДНИКИ И ГЛЕТЧЕРЫ 187–225

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ,

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ДИНАМИКА МЕРЗЛЫХ ТОЛЩ 226–262

ПОЧВЫ В ЗОНЕ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИДЫ 263–289

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ КРИОЛИТОЗОНЫ.

КРИОСФЕРА КАК ЭКОСИСТЕМА 290–313

ПРОЧЕЕ 313–318

КРУГЛЫЙ СТОЛ 319–322

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК–НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ: ОТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДО ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Дембовский И.Н.
ООО «НТЦ «Симмэйкерс»,
igor.dembovskii@simmakers.ru

Организации, занимающиеся эксплуатацией зданий и сооружений на ММГ, накапливают большой объем данных мониторинга и изысканий за годы существования сооружения. Эта информация хранится в десятках отчетов, в таблицах, на графиках.

В отличие от этапа проектирования, на котором применяется трехмерная визуализация и численное моделирование, на этапе эксплуатации комплексная оценка состояния сооружения и прогноз динамики изменения температурного режима его основания полностью зависят от опыта конкретных специалистов. Информация из отчетов и журналов наблюдений легко интерпретируется узкими специалистами, которые глубоко погружены в процессы наблюдения и анализа данных мониторинга конкретного сооружения. Однако для представителей других подразделений и руководителей предприятия не хватает понимания ситуации, в частности, для принятия стратегических решений.

Обозначенную проблему можно решить путем создания постоянно действующего инженерно-геокриологического цифрового двойника, объединяющего продукты Frost 3D и Frost.ГТМ в уникальный сервис, который позволит получить:

-быстрый и удобный доступ ко всей информации, накопленной за период эксплуатации сооружения;

-автоматический анализ и сравнение с предельно допустимыми значениями всех измеряемых в процессе геотехнического мониторинга величин;

-автоматическое оповещение о негативных трендах при отклонении допустимых значений;

-трехмерную визуализацию текущего состояния мерзлотных толщина всей территории предприятия, основанную на результатах физико-математического моделирования;

-ретроспективный анализ с целью адаптации модели в условиях отсутствия некоторых исходных данных;

-геокриологический прогноз состояния грунтов на основании данных мониторинга;

-сравнение эффективности применения различных решений по дополнительной термостабилизации грунтов основания сооружения.

Frost.ГТМ – программа, которая позволяет аккумулировать и автоматически обрабатывать данные геотехнического мониторинга и, таким образом, упростить и ускорить выполнение задач для специалистов ГТМ, снизив влияние человеческого фактора. При этом пользователю доступен широкий спектр возможностей для визуализации данных. Важной особенностью системы является возможность оценки вероятности наступления аварийного состояния сооружения.

Frost 3D – программный комплекс, предназначенный для численного моделирования температурного режима грунтов, расчета осадки при оттаивании и расчета несущей способности свай. Отличительными особенностями Frost3D, позволяющими применять программный комплекс для реализации цифровых двойников, являются:

-возможность создания и дискретизации трехмерных моделей больших размеров – десятки км^2;

-воссоздание рельефа местности на основании данных сканирования поверхности;

-воспроизведение инженерно-геологического строения в соответствии с данными изысканий;

-учет в математической модели, заложенной в цифровом двойнике, существенных к растеплению факторов, таких как водоёмы и наличие фильтрационных потоков в грунтах.

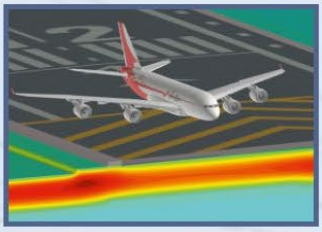
Комплексное применение современного программного обеспечения для мониторинга позволяет обрабатывать огромные объемы данных, производить ретроспективный анализ и прогноз динамики наблюдаемых параметров, контроль состояния мерзлых грунтов в режиме реального времени

НТЦ «Симмэйкерс»

Разработчик
Frost 3D и Frost.ГТМ

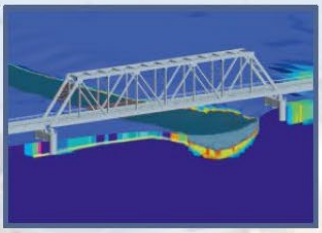
Frost 3D

ПАКЕТ ПРОГРАММ



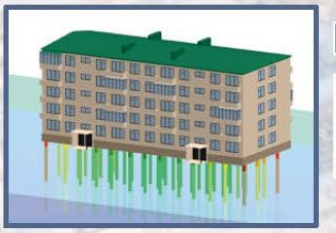
Frost.Термо

Тепловые расчеты и прогноз для многолетнемерзлых грунтов



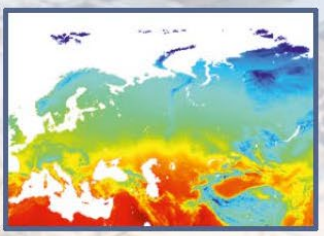
Frost.Осадка

Расчет осадки грунта при его оттаивании



Frost.Свая

Расчет несущей способности свай в мерзлых и талых грунтах



Frost.Климат

База климатических и геокриологических данных

Frost.ГТМ

Программа для автоматизации ведения геотехнического мониторинга в условиях криолитозоны

Совместное использование **Frost 3D** и **Frost.ГТМ** позволяет создать полноценный цифровой двойник оснований сооружений на ММГ.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОНИТОРИНГА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ. ПРИНЦИПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Мельников В.П., Железняк М.Н., Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В., Булдович С.Н., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Остарков Н.А., Осокин А.Б., Федоров Р.Ю., Фролов К.Н., Хрусталев Л.Н.

В Арктической Зоне, региональные работы геокриологической, инженерно-геологической и гидрогеологической направленности, системно выполнявшиеся Министерством геологии СССР, полностью прекращены в результате передачи месторождений в ведение недропользователей.

Наблюдения за фоновым состоянием вечной мерзлоты ведутся на ограниченном числе стационаров и площадок периодического посещения, принадлежащих различным научным ведомствам.

Предприятия промышленного комплекса, преимущественно нефтегазовой индустрии, с различной степенью успешности, развивают свою ведомственную систему геотехнического мониторинга (ГТМ) на площадных и линейных объектах.

Взаимодействия между упомянутыми мониторингами не существует и в этом заключается главная причина неэффективности этой деятельности. Сказывается узковедомственный подход, проявившийся даже при выполнении Поручения Президента РФ № 1971, п. 1 в. по организации мониторинга вечной мерзлоты. Назначенный исполнитель взялся только за фоновую часть мониторинга, отстранившись от геотехнической и, по факту, приняв к исполнению только половину от Поручения.

Установленные современные региональные темпы повышения температуры мерзлых толщ в Арктике и Субарктике составляют 0,05…0,08 °С/год, и в ближайшие десятилетия следует ожидать их сохранение [Мельников и др. 2021].

В этой связи существующие оценки показывают, что экономический ущерб только в АЗРФ от деформаций и разрушения инженерных объектов к середине XXI в. может составить 7-10 триллионов рублей [Streletskiy et al., 2019; Suter et al., 2019; Melnikov et al., 2022; Badina, Pankratov, 2022].

В настоящее время научное сообщество геокриологов, многие представители промышленного комплекса, региональных властей и депутатского корпуса пришли к общему пониманию, что только создание мониторинга вечной мерзлоты, как государственной системы, может во многом парировать, а ряде случаев, исключить негативные процессы в строительстве и эксплуатации объектов промышленного и гражданского назначения на территории криолитозоны в связи с происходящими изменениями климата.

Однако в стране в настоящее время не существует ведомства способного своими силами обеспечить успешное функционирование мониторинга вечной мерзлоты. Эту научно-производственную структуру необходимо создавать.

Основные пути решения в создании мониторинга как государственной системы

Несмотря на предпринимаемые попытки организации такой системы на государственном уровне, архитектура и методология этих исследований не соответствуют современным темпам и рискам освоения новых арктических регионов, включая мелководную зону шельфа северных морей.

По-нашему мнению, создание новой системы государственного мониторинга вечной мерзлоты должно базироваться на следующих принципах:

- научной основой разработки системы геокриологического мониторинга являются представления о криолитозоне, как части геологической среды с особыми свойствами, в которой могут происходить негативные изменения. Предупреждение таких явлений возможно на основе знания параметров природных и техногенных процессов и их прогнозирования.
- одной из главных методологических особенностей будущей системы мониторинга должна стать ее межведомственность.
- соблюдение *принципов системности*:

- нельзя разрабатывать какую-либо задачу автономно от других и реализовывать отдельные ее аспекты. Задачи должны рассматриваться комплексно со всеми возможными факторами.

- соблюдение целостности системы, при централизованном ее управлении.

Применительно к поставленной задаче, системный государственный подход предполагает утверждение Концепции и функционирование на постоянной основе Федеральной Программы комплексного (фонового и геотехнического) мониторинга вечной мерзлоты и научного сопровождения хозяйственной и иной деятельности на территории криолитозоны РФ.

Эта Программа должна быть включена составной частью в Перечень утвержденных Государственных Программ (например в программу **«Комфортная и безопасная среда для жизни»).**

Программой предполагается *единая методика мониторинговых наблюдений* (включая технические средства) в естественной обстановке и на объектах техногенеза, а также единая методика картирования, составление разрезов, назначения граничных условий при оценке теплового состояния толщ и геокриологическом прогнозе.

При этом важно отметить, что фоновый мониторинг вечной мерзлоты должен сопровождать геотехнический мониторинг, а не наоборот, как принято в ФС Росгидромет, где в основу размещения наблюдательной сети положен принцип «равномерной сетки», при котором удаленность фоновых объектов наблюдений от геотехнических ставит вопрос корректности сопоставления метеорологической и геотехнической информации.

Для реализации **Программы** мониторинга необходима ***разработка и принятие «Закона о вечной мерзлоте»*** с целью снижения межведомственных рисков и уточнения полномочий хозяйствующих субъектов, связанных с освоением криолитозоны.

Методологической основой создания наблюдательной сети и ведения мониторинга вечной мерзлоты в естественной обстановке и условиях техногенеза является организация специальных *геокриологических полигонов (стационаров, мерзлотных станций, региональных профилей и пр.)* как на территориях перспективного экономического развития регионов, так и на площади действующих экологически небезопасных промышленно-энергетических комплексов. Объекты наблюдения за мерзлотой в системе геотехнического мониторинга организуются по собственному протоколу предприятий (отраслей), однако наблюдательную сеть на крупных промышленных сооружениях и объектах недропользования необходимо расширить за счет включения в государственные лицензионные соглашения дополнительных специализированных термометрических скважин. Эти требования должны быть закреплены в нормативной базе на государственном уровне. Кроме того, на площади полигона необходима гидрометеорологическая станция с длительным периодом наблюдений [Брушков, Алексеев, Дроздов и др., 2024].

Мониторинг будет эффективным если удастся осуществить:

- ускоренное доизучение и картографирование инженерно-геокриологических и гидрогеологических условий территорий, информация о которых требует актуализации, как не соответствующая современному уровню, необходимому для опережающего экономического развития АЗРФ;
- создание региональных баз и федерального банка пространственно привязанных данных и модулей анализа геокриологических данных, включая данные о факторах изменения геокриологических условий и активности криогенных процессов.

Это в свою очередь сделает возможным:

- обеспечение экологически безопасного функционирования объектов недропользования, промышленного, гражданского строительства и ЖКХ, транспортных систем на территории арктической криолитозоны страны.
- сохранение и использование криогенного технологического и микробиологического потенциала вечной мерзлоты, предотвращение и ликвидация медико-биологических угроз в Арктике.

Виды наблюдений в составе фонового и геотехнического мониторинга

В соответствии с утвержденными программами исследуются:

- Термовлажностный режим грунтов, снежный и растительный покровы, почвы;
- Режим подземных и поверхностных вод;
- Развитие криогенных геологических процессов;

В процессе геотехнического мониторинга дополнительно фиксируется:

- состояние технических этажей, подполий зданий и температура воздуха в них;
- осадки фундаментов;

Функциональные блоки геокриологического мониторинга

Структура мониторинга вечной мерзлоты (криолитозоны) должна включать ряд основных технологических блоков.

Блок сбора исходных данных.

Блок обработки и анализа мониторинговой информации

Блок принятия решений

Резюмируя целевое назначение выполняемых задач мониторинга вечной мерзлоты на полигонах, следует отметить основные источники финансирования этих работ.

На площади полигона:

- фоновый мониторинг проводится за счет бюджетного финансирования на:
  - *геокриологических стационарах;*
  - *региональных профилях опорных инженерно-геокриологических и гидрогеологических скважин и площадках периодического обследования;*

- геотехнический мониторинг проводится на*:*

- территории городских и муниципальных агломераций силами мерзлотных

- станций за счет бюджетных средств и софинансирования Минстрой и ЖКХ

-территории недропользователей и собственников промпредприятий за счет собственных средств своими силами или по найму с учетом технических (геологических) заданий в рамках лицензий на право пользование недрами в границах отводов.

- проведение комплексной инженерно-геокриологической экспресс–съемки и картирования в масштабе 1:500 000 выполняется за счет федерального бюджета с целью доизучения геокриологических и гидрогеологических условий полигона, как основы для экстраполяции мониторинговых данных и создания теплофизической модели полигона для прогнозных оценок.

Для координации межведомственных отношений, финансирования и функционирования системы мониторинга криолитозоны Арктики и Субарктики необходимо создание нового государственного органа: ***Федерального агентства*** или ***Комитета по вечной мерзлоте при Правительстве РФ*** (по аналогии с Комитетом М.И. Сумгина, 1930 г. или Главсеморпути – И.Д. Папанина, 1932 г.)

Создание, в рамках упомянутого Федерального агентства ***Аналитического Центра федерального уровня***, который бы позволил реализовать единую техническую политику создания и функционирования межведомственной системы мониторинга вечной мерзлоты для всей территории криолитозоны страны (11 млн. кв.км) становится в настоящее время актуальной государственной задачей Российской Федерации. Только такой Центр и его региональные филиалы, поддержанные на законодательном уровне, будут способны осуществить комплексирование методик наблюдений, выполнение анализа колоссального количества данных и регулировать их межведомственный (для субъектов всех форм собственности) обмен, разрабатывать и координировать разработку геокриологических прогнозов, определять нормативные предельные нагрузки на вечную мерзлоту в различных регионах страны. Положение об аналитических центрах федерального и регионального уровней должно быть неотъемлемой составной частью Программы «Вечная мерзлота России»

KRIO LAB

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТОВ

Система сбора данных

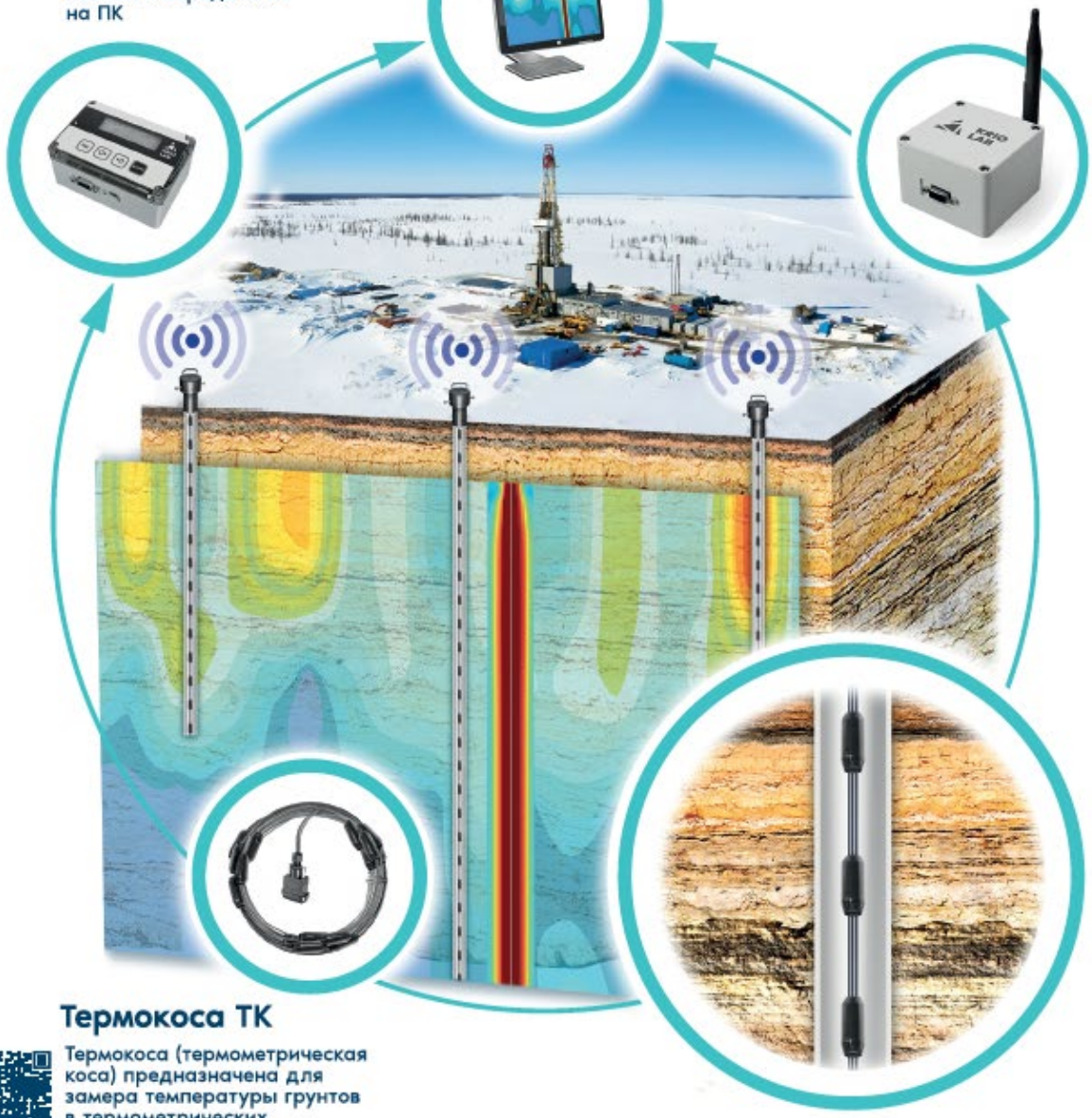
Предназначена для приема и накопления температурных данных

Портативный контроллер TKL

Предназначен для считывания результатов измерения с термокос ТК, сохранения результатов в энергонезависимой памяти и передачи их на ПК

Портативный контроллер TKL-Log

Предназначен для сбора и передачи данных по проводным и беспроводным протоколам связи



Термокоса ТК

Термокоса (термометрическая коса) предназначена для замера температуры грунтов в термометрических скважинах

KRIO LAB | СЕВЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ | + 7 (499) 302-33-45 | ООО «КриоЛаб» kriolab.ru г. Москва

СИСТЕМНОЕ НАУЧНОЕ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА В КРИОЛИТОЗОНЕ

Ривкин Ф.М.[1], Дроздов Д.С.[1,2], Лехт В.В[3], Курчатова А.Н.[1,4]
[1]*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, f-rivkin@narod.ru*
[2]*Российский государственный геологоразведочный университет МГРИ*
[3]*Тоннельная Ассоциация России*
[4]*АО «Мессояханефтегаз»*

Научно-техническое сопровождение является составной частью практически любого крупного проект и обеспечивает качество изысканий, проектирования и строительства инженерных объектов, их устойчивое работоспособное состояние в период эксплуатации. Однако примеры системного, а не фрагментарного (для отдельных сооружений или стадий изысканий, проектирования и мониторинга), научного сопровождения малочисленны, и относятся они, как правило, только к отдельным особо опасным, технически сложным и уникальным объектам. Необходимость научно-технического сопровождения закреплена в государственных стандартах (в частности, в ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» и некоторых других), СП 539.1325800.2024, а также непосредственно связана с принятой в Российской Федерации Стратегией развития Арктики («О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года»).

Научно-техническое сопровождение - это «комплекс работ научно-исследовательского, методического, экспертного и контрольного характера, выполняемых специализированными научно-исследовательскими организациями в процессе изысканий, проектирования, строительства, эксплуатации, реконструкции, сноса (демонтажа) зданий и сооружений для обеспечения их качества, надежности, механической безопасности, функциональной пригодности и долговечности» (СП539.1325800.2024). Но в этом документе отсутствует требование о необходимости организации сквозного научно-технического сопровождения, отвечающего за сопровождение всего проекта в целом.

Ранее комплексное научно-техническое сопровождение проектов в криолитозоне обычно реализовывалось в рамках крупных, государственных программ и при строительстве в сложных природных условиях. НТС, как правило, осуществлялось с привлечением базовых отраслевых научных и проектно-изыскательских институтов (ПНИИИС, ВСЕГИНГЕО, ВНИИСТ, НИИОСП, ЦНИИИС и др.) и профильных институтов АН СССР.

В настоящее время произошло существенное сокращение организационного и кадрового резервов для выполнения наукоёмких работ в составе инженерных изысканий, в том числе и комплексного научно-технического сопровождения. Это касается и специализированных отраслевых организаций, университетов и институтов РАН. В то же время планы активизации освоения Арктики и Субарктики, особенно на фоне неопределённости изменения инженерно-геокриологических условий, обусловленных современной тенденцией изменения климата, требуют, на наш взгляд, комплексного и системного научного и научно-технического сопровождения. Это касается как отдельных проектов, так и организации региональных систем рационального пользования в криолитозоне в целом.

В условиях сокращения этапности изысканий и проектирования и возможности, соответственно, текущих корректировок принимаемых решений возрастает роль внедрения системного НТС. Система научно-информационного сопровождения должна обеспечивать работы по проекту комплексной актуализированной информацией, сконцентрированной в общих и специализированных картографических моделях (в том числе геотехнических), базах данных, интерпретациях ДЗЗ и т.д., трансформированных в геоинформационное сопровождение проекта в целом.

Предшествующий опыт выполнения научно-технического сопровождения (фрагментарного, расширенного и системного) позволяет заключить, что НТС можно эффективно использовать и для крупных, и для локальных сложных объектов: (а) для крупных линейных и площадных объектов (дороги, трубопроводы, лицензионные участки месторождений и т.п.) – на основе опережающего многоцелевого картирования как информационного сопровождение инженерных изысканий, проектирования и мониторинга; (б) для локальных объектов, сооружаемых в сложных горно-геологических и инженерно-геокриологических условиях (мосты, тоннели, площадки резервуаров и т.п.) – с привлечением специализированных экспертных групп. Это показывает, что в современных условиях научно-техническое сопровождение является наиболее действенным методом повышения эффективности инвестиций и качества проектно-изыскательских работ в Арктике и Субарктике, и что оно должно быть обязательным в следующих основных случаях:

- при реализации крупных инфраструктурных проектов;

- при строительстве локальных объектов (мосты, тоннели и т.п.) в сложных природных условиях;
- при планировании и организации региональных систем рационального природопользования;
- при планировании и организации систем и элементов мониторинга (фонового, регионального и геотехнического).

В конечном итоге НТС – это инструмент для повышения надежности и безопасности промышленных и гражданских объектов.

Анализ выполнения системного НТС крупных проектов в криолитозоне позволяет выделить базовые варианты научно-технического сопровождения:

- опережающее многоцелевое моделирование инженерно-геокриологических условий, включая картографическое и геоинформационное моделирование;
- создание экспертной группы специалистов и экспертов профильных научных и производственных организаций.

Работа выполнена институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (тема: “Изучение формирования, структуры, изменчивости и прогнозирование состояния криосферы, в том числе многолетнемерзлых толщ и криогенных ландшафтов”, № FWRZ-2021-0012

ЭТАЛОН
АО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

АО «НПП «Эталон» - разрабатывает и изготавливает автоматизированные системы геотехнического мониторинга мерзлых, промерзающих и протаивающих грунтов

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Круглосуточное автоматизированное наблюдение за температурой в различных средах: грунт, вода, воздух

Автономность системы: работа возможна в отсутствии связи и электроснабжения

Состав

- Термокосы общепромышленные
- Термокосы взрывозащищенные
- Контроллеры: портативные и стационарные
- Логгеры цифровых датчиков
- ШСПД (шкафы сбора и передачи данных)
- Программное обеспечение, включая обновления

Передача данных на принимающее устройство

- по USB кабелю
- GSM по сотовой GSM связи
- по радиоканалу
- LoRaWAN по сети LoRaWan

644009, Россия, г. Омск, ул. Лермонтова, 175
fgup@omsketalon.ru
omsketalon.ru
(3812) 36-84-00, 36-94-53, (3812) 36-79-18, 32-80-51

ПЕРСПЕКТИВЫ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В МГУ

Брушков А.В., Комаров И.А., Кошурников А.В., Хрусталев Л.Н., Чеверев В.Г.
Геологический факультет, Московский Государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

Особенностью современных изменений природной среды является потепление конца XX в. - начала XXI в., особенно заметное в последнее десятилетие. В криолитозоне в некоторых районах температура воздуха за последние 25 лет возросла до 2ºС и более. Повышение температуры воздуха и увеличение количества осадков, особенно снега, приводит к изменению условий теплообмена, и в том числе за счет изменения влияния растительных покровов. Тенденция потепления, вероятно, сохранится в XXI века, что подтверждают модели глобального климата (IPCC, 2022). Связь температуры воздуха и температуры горных пород, как известно, не является прямой, но потепление климата ведет, как правило, к повышению температуры горных пород. Техногенез дополняет воздействие фоновых климатических изменений.

Потепление и связанное с ним повышение температур оснований зданий и инженерных сооружений, деградация вечной мерзлоты значительно повысили риски в строительстве и недропользовании, возросли эпидемиологические и экологические угрозы на осваиваемых территориях. Учитывая проектный запас прочности оснований по несущей способности, можно предполагать ее снижение и потерю на значительной части криолитозоны в ближайшие десятилетия. Кроме того, возросшие техногенные нагрузки и нарушения условий эксплуатации уже привели к значительному росту деформаций зданий и инженерных сооружений в Арктике. Доля деформированных объектов, по разным данным, достигает 40% и более; отмечается потеря несущей способности оснований даже недавно построенных зданий и сооружений. Наблюдаются современные деформации трубопроводов, автомобильных и железных дорог, энергетических и коммуникационных линий. При этом средний расчетный срок службы многих городских, муниципальных зданий и промышленных сооружений в Арктике без реконструкции и капитального ремонта во многих случаях превышен, в том числе для ответственных объектов – энергетических станций, зданий социальной инфраструктуры.

В связи с этим последние годы усилия специалистов МГУ и других организаций были направлены на разработку концепции мониторинга вечной мерзлоты, включающего геокриологический прогноз. Актуальность современной государственной системы мониторинга вечной мерзлоты определяется тем, что геокриологическая, инженерно-геологическая и гидрогеологическая изученность криолитозоны, в том числе мониторинговыми наблюдениями, картированием осваиваемых регионов, полевыми и лабораторными исследованиями мерзлых грунтов не соответствует темпам освоения Арктики. Сегодня, к сожалению, отсутствуют координация и регулирование работ недропользователей (градостроительных агломераций, промышленных предприятий и других собственников) по ведению геотехнического мониторинга (ГТМ), отсутствует межведомственный обмен информацией, массивы данных инженерных изысканий и ГТМ не доступны для экспертного и научного сообщества, прогнозы состояния вечной мерзлоты, как правило, не разрабатываются. Такой прогноз является частью мониторинга, который может быть выполнен при условии сбора данных по параметрам природной среды, требуемых для численного моделирования (Основы мерзлотного прогноза…, 2016). Мониторинг должен включать и разработку технических решений, обеспечивающих устойчивость объектов инфраструктуры. Состав наблюдаемых параметров вечной мерзлоты в существующих системах мониторинга, как правило, недостаточен для разработки прогнозов.

Одним из важных достижений кафедры геокриологии в последние годы является проведение научных исследований по теме «Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата», частично опубликованных в монографии с тем же названием (Хрусталев и др., 2011). Надежность северной инфраструктуры в условиях климатических изменений предлагается оценивать с учетом случайной изменчивости природно-климатической и техногенной информации. Опасность аварий сооружений оценивается до окончания срока их эксплуатации, что позволяет заблаговременно применять управляющие решения. Предложены методы управления надежностью оснований сооружений. Показано, что прогноз и управление надежностью северной инфраструктуры возможен лишь с позиций вероятностно-статистического подхода. Вероятностно – статистические методы расчета теплового и механического взаимодействия инженерных сооружений с окружающей средой имеют большие преимущества по сравнению с детерминистическими методами, входящими в состав почти всех нормативных документов. Они учитывают случайную изменчивость всей расчетной информации и на этой основе позволяют оценивать опасности (риски) возможных аварий сооружений

до окончания срока их эксплуатации, что невозможно сделать, используя детерминистические расчеты. В связи с этим вариантное проектирование приобретает новый смысл, появляется возможность оценивать варианты не только по стоимости, но и по вероятности их безаварийной работы. Кроме того, появляется возможность предсказывать аварии уже построенных зданий и на основе этих предсказаний принимать управляющие решения. Особое значение вероятностно - статистические методы приобретают в условиях климатических изменений – процесса по сути своей случайного и плохо прогнозируемого. Для этого случая авторами предлагается при оценке несущей способности многолетнемерзлых оснований использовать сочетание вероятностно-статистического метода с нормативным детерминистическим. Связующим звеном между ними служит коэффициент надежности, который находится из решения вероятностно-экономической задачи с использованием, разработанного на кафедре геокриологии метода прогноза температуры воздуха. На рисунке 1 в качестве примера показана карта изолиний коэффициента надежности.

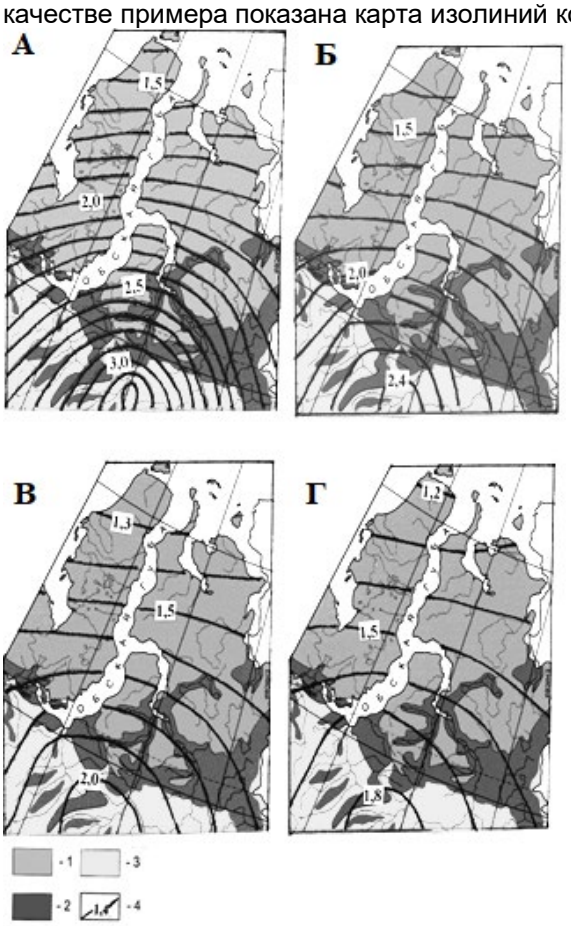


Рисунок 1. Карта изолиний kн на территории Западной Сибири: 1 – 3 геокриологические зоны; 4 – значения коэффициента kн; А – при погружении свай в грунт 6 м; Б – при погружении свай в грунт 8 м; В – при погружении свай в грунт 10 м; Г – при погружении свай в грунт 12 м

В связи обеспечением устойчивости мерзлых оснований в условиях климатических изменений актуальной областью научных исследований является разработка и применение термостабилизаторов, теплотехническое обоснование их применения в различных мерзлотных условиях. Специалисты кафедры участвуют в научно-практических работах по управлению температурным режимом мерзлых оснований на п-ве Ямал. Важным направлением научной деятельности кафедры является физико-химия и механика мерзлых горных пород. Получены новые научные результаты в исследованиях равновесий минерализованных растворов при промерзании и оттаивании, что позволяет выполнять прогноз химического состава кропэгов и засоленных горных пород, установлены закономерности криогенного метаморфизма поровых растворов пород и криопэгов морского типа засоления, в процессе изменения термобарических условий (Комаров и др., 2012). Выявление закономерностей криогенного метаморфизма позволяет разработать обоснованные методики проведения прогнозных и эпигнозных (палеореконструкции) оценок температурного и водно-ионного режима засоленных пород, определяющего состояние и эволюцию криолитозоны (зоны шельфа северных морей, приморские низменности), которые в настоящее время интенсивно осваиваются, в первую очередь, как газо- и нефтеносные районы. Разработана численная модель промерзающего грунта с учетом миграции влаги и формирования криогенного строения (Чеверев и др., 2022). В этой численной модели положен новый для геокриологии фрактальный принцип построения пространства грунта.

На кафедре продолжены исследования Арктического шельфа. Разработан и реализован новый принцип комплексного анализа геолого-геофизических данных для изучения многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе. Он заключается в комплексировании электромагнитных зондирований, лабораторных испытаний грунтов, буровых работ, термометрии и моделировании тепловых полей. Изучены мощности многолетнемерзлых толщ на различных участках арктического шельфа по результатам теплового моделирования. Их корреляция с мощностями высокоомного слоя указывает на присутствие на восточном секторе Российской Арктики газогидратной толщи. На основе аналитических и экспериментальных результатов, впервые построена карта кровли, подошвы и сплошности многолетнемерзлых пород для арктического шельфа России.

В настоящее время остро стоит проблема геокриологического образования. Несмотря на совершенствование программ подготовки, участие студентов в современных крупных проектах в

криолитозоне, общий выпуск специалистов-геокриологов, в частности на кафедре геокриологии, в основном не превышающий 10 человек в год, недостаточен для обеспечения потребностей освоения Арктики и Сибири, особенно в связи с развертыванием системы мониторинга вечной мерзлоты. Необходимо также укрепление связей с предприятиями, целевая подготовка специалистов, а также развитие инженерных программ переподготовки для послевузовского образования.

Брушков А.В., Алексеев А.Г., Дроздов Д.С., Дубровин В.А. и др. Мониторинг вечной мерзлоты. Москва, Академический проект, 2024, 463 стр.

Комаров И.А., Мироненко М.В., Кияшко Н.В. Совершенствование нормативной базы, по расчетной оценке, теплофизических свойств засоленных пород и криопэгов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 2. С. 25-30.

Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях: учебное пособие для студентов геологических специальностей вузов. В. А. Кудрявцев, Л. С. Гарагуля, С.Н.Булдович, К. А. Кондратьева, В. Г. Меламед и др.; под ред. Л.С. Гарагули и А.В.Брушкова. – Издание 2-е, переработанное и дополненное, М. : Геоинфо, 216. 512 с.

Хрусталев Л.Н., Пармузин С.Ю., Емельянова Л.В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата. - М.: Университетская книга, 2011. - 260 с.

Чеверев В.Г., Сафронов Е.В., Алексеев А.Г., Гречищева Э.С., 2022. Лабораторные методы определения теплофизических характеристик мерзлых и талых грунтов: аналитический обзор. Инженерная геология, Том XVII, № 1, с. 64–72, https://doi.org/10.25296/1993-5056-2022- 17-1-64-72.

IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

БИПОЛЯРНЫЙ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ - ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Абрамов А.А.[1], Лупачев А.В.[1], Федоров-Давыдов Д.Г.[1], Холодов А.Л.[2]
[1]Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино
[2]University of Alaska Fairbanks, Geophysical Institute, Fairbanks, USA,
forestpro@gmail.com

Оборудование скважин для мониторинга температурного режима пород входило в задачи лаборатории криологии почв с момента основания. В Арктике, наблюдениями был охвачен, преимущественно, восточный сектор – от Индигирки до Колымы, скважины на Лене и в горной части Камчатки. С началом исследований в Антарктиде, термометрические скважины были оборудованы и в южном полушарии, преимущественно в районе расположения российских станций при логистической поддержке Российской антарктической экспедиции.

Импульс к использованию автоматизированных систем сбора информации был связан с появлением международных проектов CALM (Циркумполярный мониторинг деятельного слоя) и TSP (Термическое состояние многолетнемерзлых пород), в рамках которых они безвозмездно предоставлялись зарубежными коллегами. В состав работ было добавлено измерение глубины сезонного оттаивания на размеченных площадках.

В настоящий момент функционирует 10 скважин и 19 площадок в Арктике и на Камчатке, 5 скважин и 4 площадки в Антарктиде. Правда приходится признать, что прекращение зарубежного финансирования российских участников в рамках международных мониторинговых проектов привело к невозможности проведения замеров в Арктике в летнем сезоне 2024 года.

Таким образом, устойчивое существование систем геокриологического мониторинга возможно, скорее всего, при наличии государственной поддержки, которая в настоящий момент направлена на создание собственной системы.

Выражаем признательность и благодарность всем, кто помогает скачивать данные и проводить замеры, Российской Антарктической экспедиции - за возможность работать в южном полушарии, зарубежным коллегам – за предоставленное оборудование и многолетнюю поддержку.

Исследования выполняются в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FMRM-2022-0009).

SOILART

Почва источник питания для всего живого и нас с детства учат о том, что она необходима для нашей жизни. Прикладной подход превалирует на протяжении всех периодов нашего знакомства с ней. Почву напрямую ассоциирует с едой, огородом, газоном, а в целом, с плодородием. Однако то, что ее нельзя увидеть, привело к тому, что мы упускаем ее такую важную функцию - *эстетическую*. Почва, как объект Природы может быть и красива, и необычна, надо только захотеть это увидеть.

На семинаре мы продемонстрируем красоту Почвы, как объекта искусства - искусства самой Природы. Расскажем о различных направлениях эстетики Почвы, пересечении эстетики и науки в почвоведении.

Бонусом будет мастер-класс на котором мы покажем, как с помощью почвы создать предметы искусства.

МИР ПОД НОГАМИ: ЭСТЕТИКА НЕВИДИМОГО

ПРИВЕТСТВЕННЫЕ ДОКЛАДЫ

COOPERATION WITH PERMAFROST COLLEAGUES IN THE FSU AND RUSSIA: LOOKING BACK TO THE FUTURE

Brown J.
Past President, International Permafrost Association (2003-2008)
jerrybrown@igc.org

This presentation is a tribute to the many senior Russian permafrost colleagues and to the younger generations, including members of PYRN and the Cryosol communities. We have in common our collective interests in permafrost science and engineering and cold-dominated soils. The Pushchino conferences provided a focus for these collective interests. Of the fifteen conferences, I had the privilege to attend seven of them and the 2007 conference in Salekhard:1992, 1996, 1997, 1999, 2000, 2002, 2005.

These conferences provided continuing opportunities for non-Russians to meet with and exchange information with our Russian colleagues. These exchanges included continuing updates on two major international monitoring programs: the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) and the Thermal State of Permafrost (TSP). The original Cryosol Working Group had its beginning here in1992, and these members continue to provide valuable international leadership, including multiple conferences in Russia and Europe. We owe a special tribute to David Gilichinsky for his role in organizing many of these conferences in Pushchino and his contributions to international cooperation.

I had the opportunities to participate in many international activities with Soviet and Russian colleagues that date back to 1963, and the first International Conference on Permafrost (ICOP) in the United States. That conference was attended by three Soviet researchers including Pavel Ivanovich Melnikov and the proceedings included more than 20 papers by Soviet authors.

International cooperation subsequently developed with visits to Siberia and the Far East. This started with a visit in 1966 by Canadian researchers Roger Brown and Hank Johnston. The first multi-national visit to Yakutsk included 50 non Soviets in 1969 as part of the International Geographical Union conference. The conference included the memorable excursion on the Lena and Aldan Rivers. The field trip was the introduction for many of us to view the extensive Yedoma deposits, and with discussions on the origin of the sediments: wind vs water deposition? The conference and logistics were organized and hosted by P. I. Melnikov of the Permafrost Institute. it was subsequently considered a “dry run” for the Second ICOP that took place in Yakutsk in 1973.

During the 1970s many international visits took place and was highlighted for the United States by an extensive 1974 field trip to Yakutia and the Magadan region. More formal international activities took place in 1978 at the Third International Conference of Permafrost in Edmonton, Canada. This was followed in 1983 by the Fourth ICOP in Fairbanks where the International Permafrost Association was established. P.I. Melnikov became the IPA’s first president to be followed over the years by Russian Vice Presidents: V. P. Melnikov (1988), N. N. Romanovsky (1993), F. E. Are (1996), and G. Perlstein (2003) and members of the Executive Committee D. Drozdov (2008), D. Sergeev (2012), and A. Abramov (2018).

A major highlight of the late 1980s was the international conference and field trips on the Gydan and Yamal peninsulas in August 1989 and organized by P. I. Melnikov and V. P. Melnikov. The conference could be directly attributed to the October 1987 Gorbachev speech in Murmansk that focused on expansion of international cooperation in the North. During the1980s there were important permafrost contributions to the IPCC Assessments.

Extensive cooperation continued throughout the 1990s; notable was the initiation of the Pushchino conferences in 1992; formation of the Cryosol Working Group that has recently been transformed to a new commission on Permafrost Affected Soils; and subsequent tri-national preparation of the circumarctic permafrost map. The twenty-year plus program on the Lena Delta with German colleagues had its origin here in 1992 under the leadership of Hans Hubberten.

Other international conferences in Russia included the 1998 Novosibirsk NATO workshop, and multiple conferences in both Tyumen and Salekhard; the latter including the Tenth ICOP in 2012, and other international workshops and conferences on cryopedology. Approximately 150 members of the Permafrost Young Researcher Network (PYRN) attended each of the Salekhard and Potsdam ICOPs, and now PYRN includes a Russian Branch (https://vk.com/pyrn_russia). The joint U.S.-German-Russian Lake Elgygytgyn Project with its successful drilling in 2008 was a major accomplishment.

Starting in 2001 international regional permafrost conferences under the auspices of the IPA have taken place in nine countries at two-year intervals between ICOPs. The following table includes a list of the international and recent regional permafrost conferences with the numbers of attendees including Russian participants. Both the 2016 Eleventh ICOP in Potsdam and the 2023 RCOP in Spain were conferences with significant Russian participation. Unfortunately, the recent ICOP in Whitehorse had no *in person* Russian attendees. A poster was presented at that conference reporting on past attendance at previous ICOPs (Brown et al. 2024). A revised Russian version is presented at this conference. Of the 4153 attendees at all twelve conferences, 283 from 19 countries are known deceased, and sadly since 2016 includes 26 Russians.

Ideally, Russian participation in the 2026 regional conference in Mongolia and the 13th ICOP in Florence in 2028 will see a return to significant Russian participation. The Fifth International Polar Year in 2032-2033 offers a continuing opportunity to demonstrate the contributions of Russian permafrost monitoring and research activities, including results of research on carbon pools and fluxes.

Many details of this presentation are currently *in press* as a report in *Information North* of the journal *Arctic***.** https://arctic.ucalgary.ca/arctic-journal

Brown, J., Stanilovskaya, J., McGraw, M., and Lewkowicz, A., 2024. Attendees and Memorial for Participants in International Conferences on Permafrost (1963-2016); poster presented at the International Conference on Permafrost, Whitehorse, Canada, June 2024.

Table 1. Attendance at International and Recent Regional Permafrost Conferences

Conference	Location	Year	Total	Russians
First ICOP	West Lafayette, USA	1963	285	6
Second ICOP	Yakutsk, Russia	1973	400	277
Third ICOP	Edmonton, Canada	1978	442	26
Fourth ICOP	Fairbanks, USA	1983	851	6
Fifth ICOP	Trondheim, Norway	1988	305	10
Sixth ICOP	Beijing, China	1993	275	33
Seventh ICOP	Yellowknife, Canada	1999	268	9
Eighth ICOP	Zurich, Switzerland	2003	296	55
Ninth ICOP	Fairbanks, USA	2008	685	49
Tenth ICOP	Salekhard, Russia	2012	522	286
4th RCOP	Évora, Portugal	2014	450	18
Eleventh ICOP	Potsdam, Germany	2016	753	91
2nd Asian	Sapporo, Japan	2017	178	23
EUCOP5	Chamonix, France	2018	460	84
SouthCop	Queenstown, New Zealand	2019	115	3
Virtual RCOP	Boulder, USA	2021	416	7
EUCOP6	Puigcerdà, Spain	2023	450	18
Twelfth ICOP	Whitehorse, Canada	2024	605	4 virtual

СОТРУДНИЧЕСТВО С КОЛЛЕГАМИ МЕРЗЛОТОВЕДАМИ В СТРАНАХ БЫВШЕГО СССР И РОССИИ: ВЗГЛЯД ИЗ ПРОШЛОГО В БУДУЩЕЕ

Джерри Браун
Президент Международной ассоциации по вечной мерзлоте в период 2003-2008 гг.
jerrybrown@igc.org

Эта презентация — дань уважения многим старшим российским коллегам специалистам по вечной мерзлоте и молодому поколению, включая членов международного сообщества (PYRN) и почвоведов (Cryosol). У нас есть общие коллективные интересы в науке и прикладных вопросах в районах вечной мерзлоты и сезонного промерзания. Пущинские конференции стали фокусом для этих коллективных интересов. Из пятнадцати конференций мне посчастливилось присутствовать на семи из них: в 1992, 1996, 1997, 1999, 2000, 2002, 2005 годах и на конференции в Салехарде 2007 года.

Эти конференции предоставили зарубежным коллегам возможность встречаться и обмениваться информацией с российскими коллегами. Эти обмены включали в себя постоянное обновление двух крупных международных программ мониторинга: Циркумполярного мониторинга активного слоя (CALM) и Термического состояния вечной мерзлоты (TSP). Первоначальная рабочая группа по криопочвам была основана здесь в 1992 году, и ее члены продолжают обеспечивать ценное международное руководство, включая многочисленные конференции в России и Европе. Мы должны выразить особую признательность Давиду Гиличинскому за его роль в организации многих из этих конференций в Пущино и его вклад в международное сотрудничество.

У меня была возможность участвовать во многих международных мероприятиях с советскими и российскими коллегами, которые датируются 1963 годом, и в первой Международной конференции по вечной мерзлоте (ICOP) в Соединенных Штатах. На той конференции присутствовали три советских исследователя, включая Павла Ивановича Мельникова, и в материалах конференции было представлено более 20 докладов советских авторов.

Впоследствии международное сотрудничество сопровождалось поездками в Сибирь и на Дальний Восток. Все началось с визита в 1966 году канадских исследователей Роджера Брауна и Хэнка Джонстона. Визит в 1969 году делегации зарубежных ученых в рамках конференции Международного географического союза в Якутск включал 50 гостей. Конференция включала памятную экскурсию по рекам Лена и Алдан. Полевая поездка стала для многих из нас открытием едомы отложений и обсуждением гипотез происхождения этих осадков: водного или эолового? Конференция и логистика были организованы и проведены П. И. Мельниковым из Института мерзлотоведения. Впоследствии она считалась «репетицией» для Второй международной конференции по мерзлотоведению, которая состоялась в Якутске в 1973 году. В 1970-х годах состоялось много международных визитов, и для Соединенных Штатов она была отмечена обширной полевой поездкой 1974 года в Якутию и Магаданскую область. Более формальные международные мероприятия состоялись в 1978 году на Третьей международной конференции по мерзлотоведению в Эдмонтоне, Канада. Затем в 1983 году состоялась Четвертая конференция по мерзлотоведению (ICOP) в Фэрбенксе, где была создана Международная ассоциация по вечной мерзлоте. Первым президентом IPA стал П.И. Мельников, за которым в последующие годы следовали российские вице-президенты: В.П. Мельников (1988), Н.Н. Романовский (1993), Ф.Э. Аре (1996) и Г. Перльштейн (2003), а также члены Исполнительного комитета Д. Дроздов (2008), Д. Сергеев (2012) и А. Абрамов (2018).

Главным событием конца 1980-х годов стали международная конференция и полевые поездки на полуострова Гыдан и Ямал в августе 1989 года, организованные П.И. Мельниковым и В.П. Мельниковым. Конференцию можно считать следствием речи М.С. Горбачева в Мурманске в октябре 1987 года, в которой основное внимание он уделял расширению международного сотрудничества на Севере. В 1980-х годах в оценки МГЭИК были внесены важные дополнения по вечной мерзлоте.

Обширное сотрудничество продолжалось в течение 1990-х годов; примечательным было начало конференций в Пущино в 1992 году; формирование рабочей группы по мерзлотным почвам, которая недавно была преобразована в новую комиссию по криопедологии, и последующая трехсторонняя подготовка Циркумполярной карты вечной мерзлоты. Двадцатилетняя программа по дельте Лены с немецкими коллегами также началась здесь в 1992 году под руководством Ганса Хуббертена.

Другие международные конференции в России включали семинар НАТО в Новосибирске 1998 года и несколько конференций, как в Тюмени, так и в Салехарде; последняя включала Десятую конференцию по мерзлотоведению (ICOP)в 2012 году и другие международные семинары и конференции по криопедологии. Около 150 молодых исследователей мерзлоты (PYRN) посетили международные конференции по мерзлоте в Салехарде и Потсдаме, и теперь PYRN включает

российское отделение (https://vk.com/pyrn_russia). Совместный американо-германо-российский проект по озеру Эльгыгытгын с его успешным бурением в 2008 году стал крупным достижением. Начиная с 2001 года, международные региональные конференции по вечной мерзлоте под эгидой IPA проводились в девяти странах с двухлетним интервалом между ICOP. В следующей таблице приведен список международных и недавних региональных конференций по вечной мерзлоте с указанием количества участников, включая российских участников. Как одиннадцатая ICOP 2016 года в Потсдаме, так и RCOP 2023 года в Испании были конференциями со значительным российским участием. К сожалению, на недавней ICOP в Уайтхосе (Канада) не было ни одного личного российского участника. На этой конференции был представлен постер, отражающий участие в предыдущих ICOP (Brown et al. 2024). На этой конференции представлена пересмотренная русская версия. Из 4153 участников всех двенадцати конференций 283 из 19 стран известны как умершие, и, к сожалению, с 2016 года среди них 26 россиян.

В идеале участие России в региональной конференции 2026 года в Монголии и 13-й конференции ICOP во Флоренции в 2028 году приведет к возвращению значительного российского участия. Пятый Международный полярный год в 2032-2033 годах предлагает постоянную возможность продемонстрировать вклад российской деятельности по мониторингу и исследованию вечной мерзлоты, включая результаты исследований содержания и потоков углерода.

Многие детали этой презентации в настоящее время находятся в печати в виде отчета в журнале Information North Arctic. https://arctic.ucalgary.ca/arctic-journal

Brown, J., Stanilovskaya, J., McGraw, M., and Lewkowicz, A., 2024. Attendees and Memorial for Participants in International Conferences on Permafrost (1963-2016); poster presented at the International Conference on Permafrost, Whitehorse, Canada, June 2024.

Таблица 1. Участие российских участников в международных конференциях по вечной мерзлоте

Конференция	Место проведения	Год	Участники	Из России
First ICOP	West Lafayette, USA	1963	285	6
Second ICOP	Yakutsk, Russia	1973	400	277
Third ICOP	Edmonton, Canada	1978	442	26
Fourth ICOP	Fairbanks, USA	1983	851	6
Fifth ICOP	Trondheim, Norway	1988	305	10
Sixth ICOP	Beijing, China	1993	275	33
Seventh ICOP	Yellowknife, Canada	1999	268	9
Eighth ICOP	Zurich, Switzerland	2003	296	55
Ninth ICOP	Fairbanks, USA	2008	685	49
Tenth ICOP	Salekhard, Russia	2012	522	286
4th RCOP	Évora, Portugal	2014	450	18
Eleventh ICOP	Potsdam, Germany	2016	753	91
2nd Asian	Sapporo, Japan	2017	178	23
EUCOP5	Chamonix, France	2018	460	84
SouthCop	Queenstown, New Zealand	2019	115	3
Virtual RCOP	Boulder, USA	2021	416	7
EUCOP6	Puigcerdà, Spain	2023	450	18
Twelfth ICOP	Whitehorse, Canada	2024	605	4 онлайн

NORTHERN FOOD AND ECOSYSTEM RESILIENCE THROUGH INTEGRATED NORTHERN KNOWLEDGE

Adrian Unc
Memorial University of Newfoundland, Canada

Farms in the cold-climate regions of Canada face unique challenges due to their small size, less fertile soils, and direct contact with natural ecosystems. They rely on locally developed innovative farming practices, including regenerative and organic methods, to enhance soil fertility and health. However, the absence of locally calibrated tools hampers the evaluation of these practices' long-term impacts. Effective nutrient budgeting is essential for maintaining soil health and mitigating biodiversity impacts on adjacent ecosystems. For resilient food production, it is crucial to understand management options' effects on soil fertility, implement verifiable methods to assess carbon stability and functions, and effectively disseminate knowledge, including successes and challenges faced by farmers. The vast geographical distribution of these farms complicates knowledge sharing across different jurisdictions, underscoring the need for integrated approaches that support ecosystem resilience and sustainable farming in the North. Fostering local knowledge and collaboration is vital for enhancing agricultural practices while preserving the environment

1 ОБЩАЯ, РЕГИОНАЛЬНАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОКРИОЛОГИЯ

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МОРЕЙ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ

Буханов Б.А.[1], Чувилин Е.М.[1,2], Шахова Н.Е.[2], Дударев О.В.[3], Семилетов И.П.[3]
[1] Сколковский институт науки и технологий, Москва
[2] Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского, Москва
[3] Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
e.chuvilin@skoltech.ru

В настоящее время российский сектор арктического шельфа является перспективным и активно осваиваемым регионом. Однако, территория арктического шельфа РФ, и особенно его восточной части, изучена крайне слабо и неравномерно. Это связано в первую очередь с тем, что проведение полноценных исследований данной территории осложняется множеством факторов, таких как огромная территория, сложная ледовая обстановка, суровый климат, крайне слабая изученность мерзлотно-геологического строения, практически полное отсутствие инфраструктуры, сложная логистика и др. Одним из наиболее значимых факторов является наличие подводной мерзлоты, которая на данной территории изучена крайне плохо из-за сложности проведения и высокой стоимости геологических работ (особенно бурения). В итоге прямые данные о наличии многолетнемерзлых пород и глубине залегания их кровли на арктическом шельфе в настоящее время крайне ограничены.

В последнее десятилетие для получения представлений о распространении многолетнемерзлых пород на шельфе активно применяются методы математического моделирования. Однако эти результаты в большинстве случаев являются условными и зависят от множества входных параметров (палеоклиматический сценарий, динамика придонной температуры, детальность и надежность геологической модели, фактические значения теплового потока, теплофизические параметры осадков и нижележащих грунтов и др.). Так, одними из важных входных параметров при проведении тепловых расчетов являются фактические данные о температуре донных отложений, которых на практике для морей Российской Арктики практически нет, в отличие от температуры придонного слоя воды, информация о котором содержится в различных базах данных и картах. Однако следует иметь в виду, что температура придонного слоя воды более изменчива под воздействием внешних факторов (сезонные изменения температуры воздуха, глубина воды, удаленность от берега, влияние речного стока, морские течения и т.д.), в отличие от температуры донных отложений, температурные изменения в которых существенно замедлены. Поэтому применительно к арктическим морям не всегда корректно приравнивать температуру придонного слоя воды к *in situ* температуре донных отложений, хотя на практике такое часто делают ввиду отсутствия фактических данных. В этой связи определение *in situ* температуры донных отложений приобретает особое значение при оценке текущего температурного состояния криолитозоны на арктическом шельфе РФ и построении актуальных прогнозных моделей изменения глубины залегания кровли и мощности подводной мерзлоты.

В ходе проведенных исследований были использованы данные, полученные в ходе рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш» (Россия) с 2019 по 2022 года и экспедиции SWERUS-C3 на ледоколе «Oden» (Швеция) в 2014 г., а также были задействованы результаты полевых работ на шельфе моря Лаптевых в период с 2011 по 2014 года. Дополнительно при анализе были использованы данные температуры донных отложений шельфа морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, полученные в экспедициях ТОИ ДВО РАН в 2003 и 2005 годах.

В результате полевых и лабораторных исследований была подготовлена схематическая карта распространения *in situ* температуры в верхней части (до глубины 0,5 м) осадков морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского (Рис. 1).

В целом полученные результаты подтверждают неравномерное распределение температуры донных отложений в арктических морях РФ. Особенно это характерно для шельфа Карского моря, где температура донных отложений варьируется в широком диапазоне: от +5,0°С в западной части до -1,4°С в восточной. Это во многом обусловлено отепляющим влиянием в западной и центральной частях шельфа теплых вод, поступающих из Баренцева моря, а также плюмами крупных рек. Дополнительно было показано, что площадное распределение температуры донных отложений хорошо коррелирует с текущими представлениями о распространении субаквальной мерзлоты, которое на данной территории достаточно сложное и неравномерное. В этой связи температуру донных отложений в арктических морях можно рассматривать как косвенный индикатор наличия многолетнемерзлых пород с заглубленной кровлей.

В результате проведенных исследований было подтверждено, что большая часть донных отложений арктического шельфа Восточной Арктики находится в диапазоне температур от -1,0°С до -1,8°С, что может косвенно указывать на широкое распространение многолетнемерзлых пород с заглубленной кровлей на исследованной территории. Также полученные данные указывают на отсутствие подводной мерзлоты при глубинах воды более 80 м, а также на существенное отепляющее воздействие на шельфовую криолитозону со стороны стока крупных сибирских рек.

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за поддержку полевых и лабораторных исследований (проект № 22-67-00025).

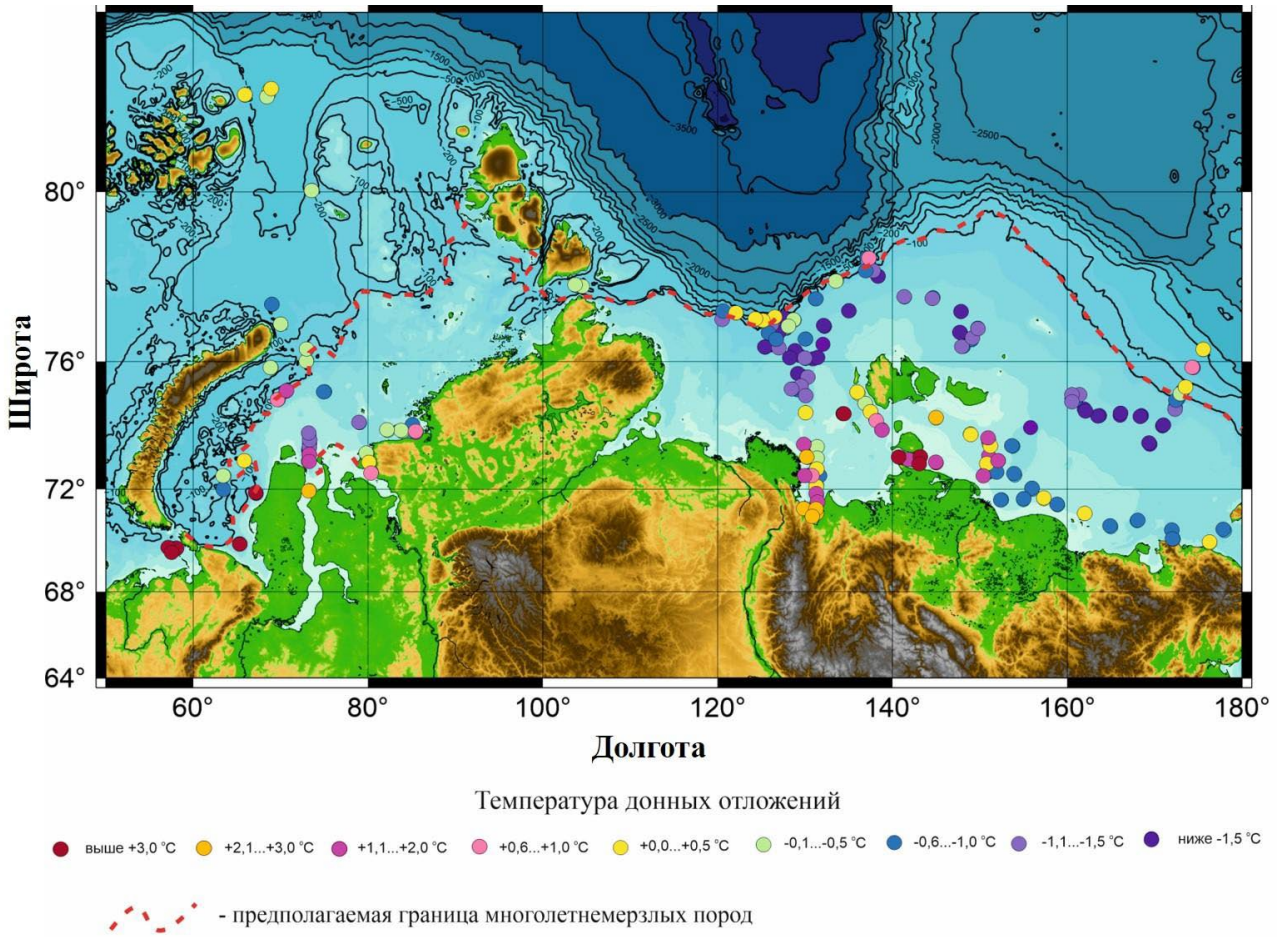


Рис. 1. Распространение температуры донных отложений арктических морей РФ (по данным https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106467).

МЕРЗЛОТНО-ЛАНДШАФТНЫЕ УСЛОВИЯ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ВИЛЮЙСКОГО ПЛАТО В ВЕРХОВЬЯХ РЕКИ МУНА

Васильев А.И.
Институт мерзлотоведения СО РАН, Якутск, vasilalex@mpi.ysn.ru

Основной целью работы является анализ состояния ландшафтов в субарктической (лесотундра, северная тайга и горные редколесья) зоне, где при современном потепление климата в последние десятилетия происходит существенное изменение мерзлотных ландшафтов. Работа написана по результатам проведенной автором мерзлотно-ландшафтной съемки в августе-сентябре 2023-24 гг., согласно техническому заданию по ландшафтному районированию территории инфраструктуры Группы компании «АЛРОСА» в Мирнинском, Нюрбинском и Оленекском районах Республики Саха (Якутия). В данной работе рассматривается Верхне-Мунское месторождение алмазов, расположенное за пределами северного полярного круга.

Верхне-Мунское месторождение алмазов было открыто в 2007 г, которое расположено в 160 км к северо-востоку от г. Удачный в Оленекском районе Республики Саха (Якутия) и относится к северо-восточной части Вилюйского плато, к верховьям бассейна р. Муна, левого притока р. Лена протяженностью около 700 км. Исследуемый район характеризуется структурно-денудационным низким плато (300-400 м), где развиты песчано-карбонатные породы кембрия, пронизанные местами трапповыми дайками, обусловливает формирование выположенных форм холмисто-увалистого рельефа с развитием пологих протяженных склонов и четкой выраженностью форм речных долин.

Согласно районированию по Мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия) масштаба 1:1 500 000 [1] рассматриваемое месторождение находится в пределах Оленекской увалистой провинции (A.II.3) сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность ММП в пределах провинции изменяется от 600 до 1000 м и более. Температура ММП на водоразделах северной тайги укладывается в интервале от -3…-4 на юге, до -5…-6 ºС на севере. На склонах северной экспозиции от -7 до -8 ºС, на склонах южной экспозиции до -5…-6 ºС [2].

На карте растительных сообществ мы выделили основные типы лесов и другой растительности по описаниям 28 точек ландшафтных условий на территории Верхне-Мунского месторождения. Получилось 3 основных сообщества на уровне групп ассоциаций, существенно влияющих на мерзлотные условия. В геолого-геоморфологической части карты нами выделено 3 основных типов местности: плакорный, склоновый и мелкодолинный.

Плакорный тип местности включает в себя плоскоравнинные (с уклоном поверхности до 2º) достаточно дренированные междуречные приводораздельные пространства плато, где развиты элювиальные и элювиально-делювиальные отложения. Данный тип местности образован на выходах горизонтально залегающих песчано-карбонатных пород и лишь местами интрузий траппов. На карбонатных породах развит щебенистый суглинок и супесь, а для доломитов и траппов характерен глыбово-щебенистый материал с незначительным суглинистым заполнителем. Плакоры заняты угнетенными лиственничными редколесьями кустарничковыми с единичной елью зеленомошно-лишайниковыми. Ведущим криогенным процессом здесь является морозобойное растрескивание, местами встречаются пятна-медальоны. Рельеф, способствующий застаиванию грунтовых вод, предопределяет повсеместное развитие западинно-бугристого и структурно-полигонального микрорельефа. Нижняя часть СТС постоянно находиться в переувлажненном состоянии с объемной влажностью грунтов от 45% до 60%. Мощность СТС варьирует в пределах 0,8-1,1 м.

Склоновый тип местности. Преобладание выходов песчано-карбонатных пород обусловливает формирование в основном пологих склонов. Для выходов относительно стойких к выветриванию доломитов и пород трапповой формации присущи более крутые и ступенчатые склоны. Здесь склоны по условиям местоположения подразделяются на:

- очень пологие склоны (2-3º) и пологие (3-5º), представленные делювиально-солифлюкционными отложениями;
- склоны средней крутизны (5-10º), сложенные делювиально-коллювиальными отложениями.

Характерные черты ландшафтной структуры обусловлены происходящими в природных комплексах склоновыми процессами. Для очень пологих склонов характерны морозобойное растрескивание, солифлюкция и пятна-медальоны. Для пологих склонов характерны солифлюкция и термоэрозия. Для склонов средней крутизны – термоэрозия. В данном типе местности преобладают ландшафты, подчиняющиеся широтно-зональной дифференциации. Состав склоновых отложений зависит от крутизны склона. На очень пологих склонах встречаются суглинки с щебнем, дресвой, на пологих склонах – суглинки, глины с щебнем и дресвой и на склонах средней крутизны суглинки щебнистые. Склоны покрыты лиственничными редколесьями кустарничковыми зеленомошно-

лишайниковыми и лиственничными редколесьями ерниковыми кустарничково-лишайниково-зеленомошными, где широкое развитие получили линейно вытянутые плоскодонные ложбины с зачаточным руслом, именуемые деллями. Система разветвляющихся делли шириной около 4-8 м и глубиной 0,5-1,5 м на пологих наклонных поверхностях, повторяющиеся через каждые 30-50 м служит для стока дождевых и талых вод. Ближе к подножью склонов имеют развитие солифлюкционные склоны и реже склоны с каменными потоками. Инсоляционные различия склонов в глубине летнего оттаивания здесь сильно не выражены, поскольку определяющую роль воздействия играет степень увлажнения поверхностей (объемная влажность грунтов от 40% до 70%) и мощность мохово-лишайникого покрова. В частности, на солифлюкционных и деллевых склонах независимо от инсоляции мощность СТС изменяется 0,3 до 0,8 м.

Мелкодолинный тип местности в целом занимает небольшую площадь. Здесь долина реки Улах-Муна несколько углублена, но имеет плоское днище. Постоянная разгрузка грунтовых вод с водосборной площади приводит к заболачиванию днища долины, где развиты аллювиальные отложения. Литологически сложен суглинками, глинами, супесями с мохово-торфяным покровом. В зависимости от условий увлажнения поверхности днище мелкой долины занят лиственничными рединами кустарничково-моховыми (сфагновыми) в сочетании с ерниками, ивняками, травяными болотами, а также ерниками, ивняками, лугами в сочетании с лиственничными рединами ерниковыми кустарничково-моховыми, для которых характерны морозобойное растрескивание, термокарст и пучение. Характерен мелкобугристый, кочкарниковый и полигональный микрорельеф. В прирусловой пойме и надпойменной террасе мощность СТС наибольшая от 0,8 до 1,1 м. Участки с постоянным переувлажнением и мохово-торфяным покровом отличаются незначительной мощностью СТС от 0,3 до 0,5 м.

К *техногенным* природно-территориальным комплексам (ПТК), происхождение и изменение ландшафтов которых происходило под влиянием прямо или косвенно действующих техногенных факторов, мы отнесли площади строений и техногенно-нарушенные участки.

На базе программы ArcGIS 10.8 осуществлена задача картографического отображения мерзлотных ландшафтов как сопряженных систем взаимосвязанных компонентов в своеобразную пространственную модель. Легенда к картам составлена в комбинированном виде. На карте отражаются типы местности, которые представлены штриховкой и растительные ассоциации, техногенно-нарушенные участки, реки, речки, границы объекта исследований и точки полевых ландшафтных исследований в 2024 г. показаны цветным фоном. Структуру ландшафтной карты Верхне-Мунского месторождения масштаба 1:100 000 составляют три типа местности и три типа растительности (рис. 1).

Для разработки научных рекомендаций по оптимизации и рациональному использованию северных территорий, прежде всего необходимо знание исходного состояния мерзлотных ландшафтов, которое можно использовать для составления карты устойчивости многолетнемерзлых пород к потеплению климата и антропогенным нарушениям с рекомендациями, где и как наиболее рационально использовать тот или иной ландшафт, а какие ландшафты не следует нарушать, чтобы не вызвать активизацию процессов с коренной перестройкой ландшафтов.

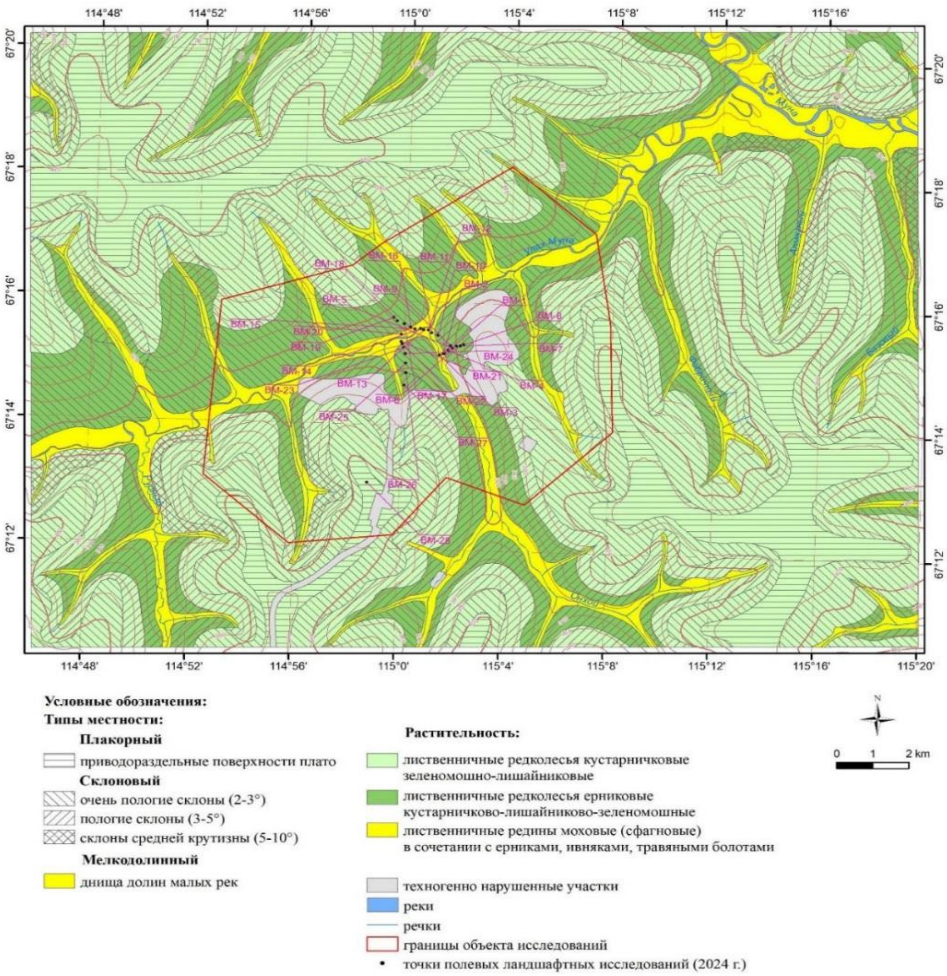


Рис. 1. Ландшафтная карта территории Верхне-Мунского месторождения масштаба 1:100 000

1. PERMAFROST-LANDSCAPE MAP OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA) ON A SCALE 1:1500000, Fedorov A.N. et al. Geossciences (Switzerland). 2018. Т. 8. № 12. 465.

2. Васильев И.С. Пространственно-временные закономерности формирования деятельного слоя в ландшафтах Западной Якутии / И.С. Васильев. – Новосибирск: Наука, 2005. – 228 с.

КРИОГЕННЫЕ СТРУКТУРЫ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ Р. ЛЕНА (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ)

Васильева А.Н.[1,2], Лыткин В.М.[2], Курбанов Р.Н.[1,3]
[1] *Институт географии РАН, Москва*
[2] *Институт мерзлотоведения СО РАН, Якутск*
[3] *Московский государственный университет, Москва*
angievasilieva@gmail.com

Приуроченность территории Центральной Якутии к древней Центральноякутской равнине, в пределах которой в четвертичное время происходило мощное накопление рыхлых отложений, определяет основные особенности развития криогенных процессов и явлений, специфику формирования, распространение, размеры и формы образований. Наличие в четвертичных отложениях следов криогенеза указывает на признаки былых похолоданий, существование ледниковых эпох.

В 2019-2021 гг. с целью изучения этапов криогенеза в Центральной Якутии, авторы провели криолитологические исследования, установили разновозрастные криогенные структуры различной морфологии, выполнили люминесцентное датирование отложений в двух наиболее информативных разрезах в пределах среднего течения р. Лена: Усть-Буотамское обнажение четвертой (бестяхской) надпойменной аккумулятивной террасы и стоянка раннего палеолита Диринг-Юрях.

При проведении работ были применены стандартные методы фациального анализа и стратиграфии: геоморфологическое обследование; поиск; выполнялись зачистки; проводилось подробное описание отложений, криогенных структур и текстур; выполнялся отбор проб на люминесцентное датирование. Нами был получен большой массив данных абсолютного датирования люминесцентным методом в Скандинавской лаборатории люминесцентного датирования в Рисо (Дания).

1) Обнажение Усть-Буотама находится на правом берегу р. Лена в 130 км южнее г. Якутск. Обнажение представляет собой наиболее мощное обнажение бестяхской аккумулятивной террасы, высотой до 120 м. В ходе исследований в строении обнажения нами было выделено 3 разногенетические пачки (сверху вниз): UB-1 (0-23 м) – эоловые пески голоценового возраста, со слаборазвитыми палеопочвами, кровля пачки выходит на поверхность в виде незакрепленной растительностью (Ленской) дюны; UB-2 (23-85 м) – эоловые пески дъолкуминской свиты, в пределах которых установлены погребенные фрагменты палеопочв; UB-3 (85-120 м) – аллювиальные отложения мавринской свиты.

В связи с тем, что большая часть обнажения (до 80 и более) представлена дюнными отложениями, для которых характерна низкая влажность (<5%) и высокая пористость, криогенные явления в обнажении развиты слабо. К установленным в эоловых отложениях погребенным почвам приурочены полигонально-песчаные клинья и псевдоморфозы по полигонально-жильным льдам. Эти образования имеют эпигенетическое происхождение и связаны с интенсивным промерзанием палеопочв. Вместе с клиньями, в отложениях встречаются следы процессов криотурбации в виде микроскладок. Результаты люминесцентного датирования отложений представлены в работах (Васильева и др., 2024; Vasilieva et al., 2024).

Стоянка раннего палеолита Диринг-Юрях (61.204199° с.ш.; 128.482205° в.д.) находится на правом берегу р. Лена, в 140 км южнее г. Якутск, на мысовом участке 105-165-метровой (VIII) табагинской террасы. В строении отложений стоянки принимают участие 5 пачек разного возраста и происхождения (сверху вниз): 1) эоловые отложения дъолкуминской свиты; 2) мощная толща эоловых отложений средненеоплейстоценового возраста; 3) гравийно-галечно-валунный дефляционный горизонт с ветрогранниками и артефактами; 4) пронизывающие табагинский аллювий первично-песчаные жилы средненеоплейстоценового возраста; 5) аллювиальные отложения табагинской свиты позднеплиоценового возраста.

В четвертичных отложениях стоянки наиболее представительными структурами являются крупные и мелкие вертикальные первично-песчаные жилы, расположенные на глубине 4.5-5.0 м на мысовом участке и на глубине 40 м в тыловом участке террасы. Они формируют сложные полигоны и являются эпигенетическими по отношению к аллювиальным отложениям табагинской террасы. Жилы достигают разнообразных размеров и сложены эоловым песком с вертикальной параллельной слоистостью. Серии слойков руслового аллювия на контакте с жилами сильно деформированы и воздымаются вверх.

В перекрывающих аллювиальные отложения средненеоплейстоценовых эоловых толщах также были установлены криогенные структуры, которые представлены сингенетическими мерзлотными и грунтовыми жилами, псевдоморфозами по ледяным клиньям. Данные

люминесцентного датирования отложений стоянки представлены в работах (Галанин и др., 2021; Lukianycheva et al., 2024; Васильева и др., в печати).

Таким образом, на основе полученных геологических и геохронологических данных установлено, что в среднем неоплейстоцене, ранее 236 тыс. л.н., во время похолодания климата произошло промерзание и растрескивание аллювиальных отложении табагинской свиты. В результате заполнения трещин эоловым песком образовались первично-песчаные жилы, мощностью до 5 метров. Далее, перекрывающая табагинский аллювий мощная толща эоловых отложений (вероятно, МИС 8-6) подверглась криогенным процессам, в результате чего сформировались мерзлотные и грунтовые жилы, псевдоморфозы по ледяным клиньям. В позднем неоплейстоцене (МИС 2) в результате промерзания погребенных палеопочв сформировались полигонально-песчаные клинья и псевдоморфозы по полигонально-жильным льдам.

Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024) «Глобальные климатические вызовы на территории России: ретроспективный анализ, прогноз и механизмы адаптации»

1) Васильева А.Н., Галанин А.А., Лыткин В.М., Г.И. Шапошников, М.С. Рожина, Р.Н. Курбанов (2024). Новые данные о строении и возрасте бестяхской террасы р. Лена (Усть-Буотамское обнажение). Геоморфология и палеогеография. Т. 55. № 3. С. 91-111. https://doi.org/10.31857/S2949178924030052; https://elibrary.ru/PLRIBK

2) Васильева А.Н., Галанин А.А., Курбанов Р.Н., Анойкин А.А., Лыткин В.М., Кирьянов Н.С., Панин А.А. Строение и условия осадконакопления четвертичных отложений табагинской террасы р. Лена/ Известия РАН. Серия географическая (в печати_

3) Галанин А. А., Курбанов Р. Н., Лыткин В. М., Васильева А. Н., Шапошников Г. И. 2021. Новые данные о строении и возрасте нижнепалеолитической стоянки Диринг (Центральная Якутия). В: Фридовский В. Ю. (ред.). Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Якутск: СВФУ, 23—26.

4) Lukyanycheva, M., Kurbanov, R., Taratunina, N., Vasilieva, A., Lytkin, V., Panin, A., Anoikin, A., Stevens, T., Murray, A., Buylaert, J.-P., Knudsen, M., 2024. Dating post LGM aeolian sedimentation and the Late Palaeolithic in Central Yakutia (Northeastern Siberia). Quat. Geochronology, V. 83, 2024, 101563. https://doi.org /10.1016/j.quageo.2024.101563.

5) Vasilieva A.N., Murray A.S., Taratunina N.A., Buylaert J.-P., Lytkin V.M., Shaposhnikov G.I., Stevens T., Ujvari G., Kertész T.G., Kurbanov R.N. Absolute dating of sediments forming the Lena river terraces (Northeastern Siberia), Quaternary Geochronology, Volume 83, 2024, 101592, ISSN 1871-1014, https://doi.org/10.1016/j.quageo.2024.101592

КРИОЛИТОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ДИНАМИКА РОСТА БАТАГАЙСКОГО ТЕРМОЦИРКА

Кизяков А.И.[1], Веттерих С.[2], Коротаев М.В.[3], Опель Т.[2], Правикова Н.В.[3], Зимин М.В.[1], Гюнтер Ф.[2], Сыромятников И.И.[4], Шепелев А.Г.[4], Лупачев А.В.[5], Гроссе Г.[2]

[1] Географический факультет, Московский Государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия
[2] Институт Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований имени Гельмгольца, Потсдам, Германия
[3] Геологический факультет, Московский Государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия
[4] Институт мерзлотоведении имени П.И.Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
[5] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия
akizyakov@mail.ru

В последние десятилетия отмечается резкая активизация экзогенных процессов, связанных с таянием мерзлых пород. Одним из наиболее динамичных и ярко проявляющихся в рельефе процессов является термоденудация, связанная с вытаиванием подземных льдов. В комплексе с другими криогенными рельефообразующими процессами термоденудация приводит к образованию специфических форм рельефа – термоцирков и термотеррас, которые могут рассматриваться как криогенно-оползневые формы. В англоязычной литературе для этих форм рельефа, а также и для обозначения процесса их образования, используется термин retrogressive thaw slump. Значительные (как по количеству, так и по морфометрическим характеристикам) проявления термоденудации наблюдаются в районах с распространением мощных залежеобразующих льдов – пластовых и полигонально-жильных.

В Якутии широкое проявление термокарста, а также термоденудации с формированием термоцирков и термотеррас связано с высокольдистыми толщами ледового комплекса. К северу от Янского плоскогорья в окрестностях поселка Батагай расположен крупнейший в мире термоцирк. В 2023 году его поперечник достигал 990 м, площадь собственно чаши термоцирка составляла 682 000 м^2, а с учетом эрозионного вреза, ведущего к реке Батагай, - 876 000 м^2. До конца 1980-х годов на материалах дистанционного зондирования на этом склоне фиксировался линейный эрозионный врез, который с 1991 года стал интенсивно расширяться, приобретая подковообразную в плане форму, характерную для термоцирков.

Проведенные весной 2019 года полевые работы позволили собрать значительный объем данных по строению отложений, вскрывающихся в стенках, и по морфологии термоцирка. В стенках высотой до 55 м вскрывается сложно построенная толща, включающая несколько горизонтов, отличающихся криогенным строением. Наиболее высокие значения суммарной объемной льдистости, достигающие 79-87% характерны для отложений Верхнего и Нижнего ледового комплекса, в которых объем полигонально-жильного льда достигает 55-70%. При этом суммарная льдистость отложений между жилами льда не сильно отличается для отложений Верхнего и Нижнего ледового комплекса, а также Верхнего и Нижнего песка изменяясь от 47 до 57% (Kizyakov et al., 2023).

Изменяющая вдоль бровки термоцирка морфология отступающих стенок и особенности рельефа днища термоцирка в значительной степени определяется криолитологическим строением вскрывающегося разреза, соотношением мощностей выделяемых горизонтов, меняющимся в пространстве. Помимо этого, суточная и сезонная инсоляция льдистых стенок определяет ход как термоденудации, так и эрозионных процессов на дне, обеспечивающих вынос талой водой оттаявшего и обрушившегося со стенок материала. Комплекс факторов криолитологического строения разреза и геоморфологических условий расположения термоцирка, определяют высокие скорости отступания льдистых стенок, достигающие 15 м/год.

В результате совместного анализа полевых данных 2019 года, лабораторных данных о составе жильных льдов и вмещающих пород, а также съемок с БПЛА в 2019 и 2023 годах, ранее выполненных исследований и опубликованных данных создана 3D-модель геологического строения участка склона, где расположен термоцирк (Kizyakov et al., 2024). 3D-модель создана в пакете Petrel (Schlumberger) и включает данные о пространственном распределении горизонтов, отличающихся криолитологическим строением, включением полигонально-жильных льдов; данные о изменчивости в пространстве мощности выделенных горизонтов; а также данные о составе горизонтов, включая характеристики льдистости, гранулометрического состава отложений и содержании органического

углерода. Модель позволяет с высокой точностью оценивать вынос материала с течением времени и эволюцию рельефа термоцирка с оценкой объемного роста чаши термоцирка.

На начальном этапе роста термоцирка в 1990-х годах интенсивно шло расширение чаши и углубление дна по мере того как в стенках вскрывалась верхняя часть разреза до подошвы Верхнего ледового комплекса, когда общая льдистость стенок достигала 81%. Дальнейшее углубление дна и включение в разрез отступающих стенок нижележащих горизонтов привели к снижению общей льдистости стенок до 40-45%.

С 2014 по 2023 годы ежегодный объем оттаивающих и выносимых пород из Батагайского термоцирка составлял около 1 млн м^3. Этот объем на одну треть состоит из талых осадков и на две трети из растаявшего подземного льда. Ежегодно высвобождается около 4000–5000 тонн законсервированного в мерзлоте органического углерода, рассчитанного как сумма общего органического углерода (TOC) отложений и растворенного органического углерода (DOC) подземного льда.

С момента своего образования и до 2023 года в результате отступания стенок за счет комплекса деструктивных процессов из термоцирка вынесен общий объем материала около 34,7 млн м^3, из которых 23,4 млн м^3 были представлены подземным льдом (за счет таяния которого был обеспечен значительный объем воды для транспорта материала и развития эрозии в днище термоцирка) и 11,3 млн м^3 талыми отложениями, включавших в общей сложности около 169500 тонн органического углерода.

Работа выполнена в рамках госзадания МГУ имени М.В. Ломоносова 121051100164-0 «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии».

Kizyakov A.I., Wetterich S., Günther F., Opel T., Jongejans L.L., Courtin J., Meyer H., Shepelev A.G., Syromyatnikov I.I., Fedorov A.N., Zimin M.V., Grosse G. (2023). Landforms and degradation pattern of the Batagay thaw slump, Northeastern Siberia. Geomorphology, 420, 108501. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108501

Kizyakov A.I., Korotaev M.V., Wetterich S., Opel T., Pravikova N.V., Fritz M., Lupachev A.V., Günther F., Shepelev A.G., Syromyatnikov I.I., Fedorov A.N., Zimin M.V., Grosse G. (2024). Characterizing Batagay megaslump topography dynamics and matter fluxes at high spatial resolution using a multidisciplinary approach of permafrost field observations, remote sensing and 3D geological modeling. Geomorphology, 109183, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109183

ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД ВОДЫ КАК ИСТОЧНИК ТЕПЛА

Куваев В.А., Кузьмин Г.П.
Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск
vak-89@bk.ru

В то время, когда освоению Арктики уделяется особое внимание, проблема энергоснабжения этих территорий и использование криоресурсов стоит актуально. Ученые и практики различных научно-исследовательских учреждений решают и изучают различные аспекты данной проблемы.

На территории распространения многолетнемерзлых пород существует необходимость и возможность эффективного использования криогенных возобновляемых природных источников энергии. В Институте мерзлотоведения СО РАН были разработаны и испытаны аккумуляторные охлаждающие и отепляющие устройства и технологии. Система охлаждения успешно реализована в Федеральном хранилище семян растений в г. Якутске. В данной работе излагаются разработки технологии отопления помещений с использованием теплоты кристаллизации воды.

Система отопления помещений включает этапы: в летнее время аккумулирования энергии путем плавления льда и использования накопленной энергии в зимнее время при замерзании воды. При этом в помещении устанавливается высокая отрицательная температура, близкая к 0˚С.

Аккумуляторами тепла являются металлические емкости с пресной водой, которые устанавливаются внутри или в подвальной части помещения. Суммарное количество воды в аккумуляторах V рассчитывается теплотехническим балансом и подразделяется на основное $V_{ос}$ и вспомогательное $V_{вс}$.

В г. Якутске с 2018 г. проводятся опытно-промышленные испытания гаража площадью более 100 м^2, отапливаемого теплотой фазового перехода воды в лед. На рисунке 1 представлены графики изменения зимних температур воздуха в помещении (а) и наружного воздуха (б). Как видно из графиков, температура в помещении при одинаковом V зависит от температуры наружного воздуха вследствие изменения $V_{вс}$, влияющего на площадь поверхности теплообмена на границе вода-лед. При V=50 м^3 и средних значениях температуры наружного воздуха в зимнее время 2019-2020 гг. минус 20,7^{0}С, 2020 -2021 гг. – минус 23,8^{0}С и 2021-2022 гг. – минус 21,2^{0}С средние зимние температуры в помещении составили соответственно минус 1,9; 3,6 и 2,6^{0}С.

Для определения $V_{ос,}$ $V_{вс}$ и параметров аккумуляторов тепла (площадь теплообменной поверхности ширина, длина и высота емкостей), разработана методика теплотехнического расчета. Объем воды $V_{ос}$ определяется из условия равенства суммарных потерь тепла из помещения в окружающую среду в течение всего холодного периода года. Объем воды $V_{вс}$ рассчитывается по эмпирической зависимости, полученной обработкой результатов многолетних испытаний опытного помещения.

На рисунке 1 представлены графики изменения температуры в опытном гараже t_2 и температуры наружного воздуха t_1 при испытаниях в 2019 - 2022 гг. в г. Якутске

Как видно из рисунка, температура в помещении, обогреваемом теплотой кристаллизации воды, значительно выше температуры наружного воздуха и изменяется в соответствии с ее колебаниями. Результаты многолетних опытно-промышленных испытаний опытного объекта подтвердили возможность отопления ряда видов производственных, спортивных и вспомогательных помещений, в которых высокие отрицательные температуры являются оптимальными или допустимыми.

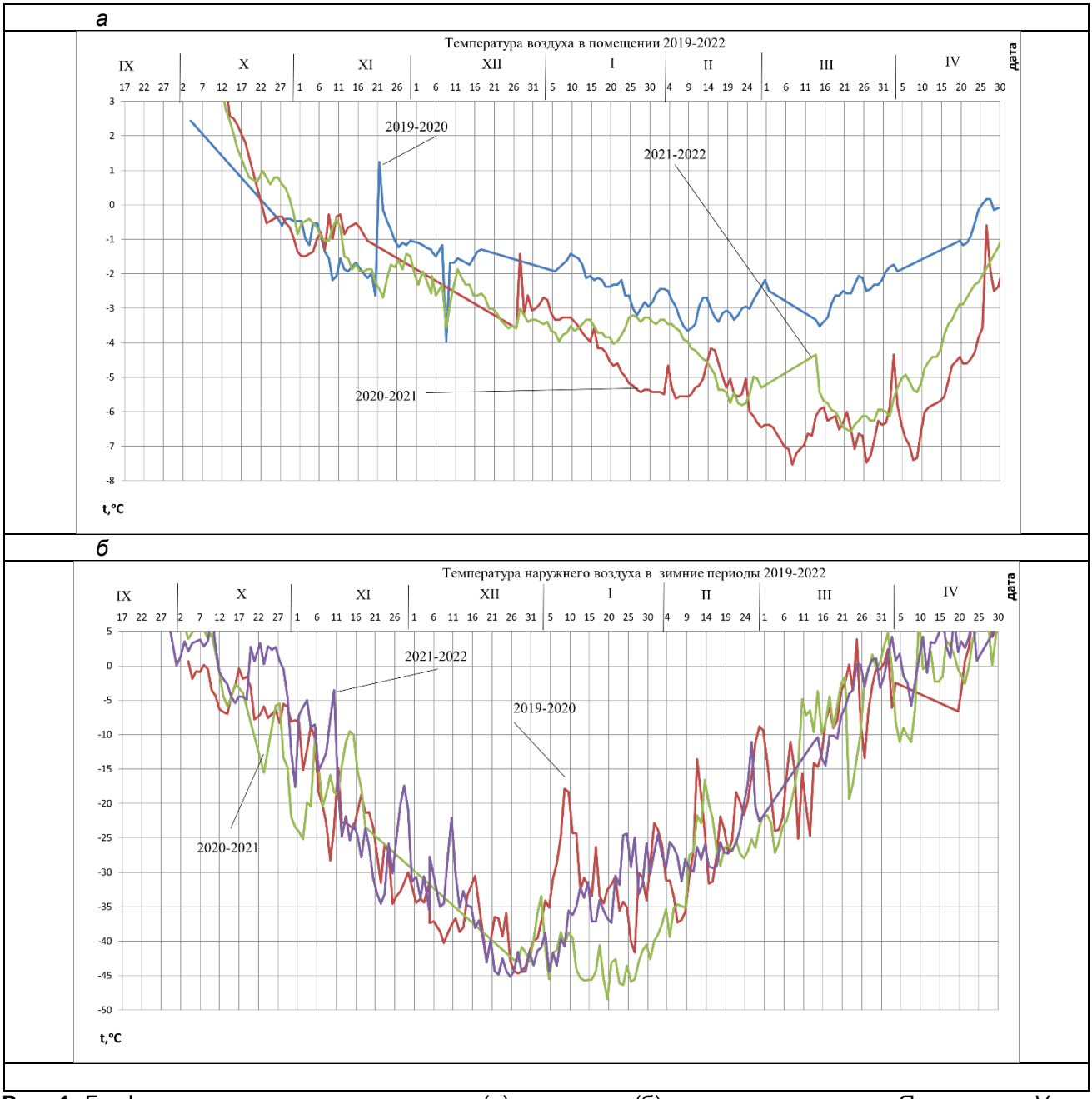


Рис. 1. Графики температур воздуха внутри (а) и снаружи (б) опытного гаража в г. Якутске при $V \sim 50$ м^3 :

1 – 2019 - 2020 гг.: t_1 = - 20,7^{0}C; t_2 = - 1,9^{0}C; 2 – 2020 – 2021гг.: t_1= - 23,8^{0}C; t_2= -3,6^{0}C; 3 – 2021 - 2022 гг.: t_1= - 21,2^{0}C, t_2 = - 2,6^{0}C

Криоресурсы в криолитозоне могут найти широкое использование в различных целях. Установлена возможность разнообразного и эффективного использования теплоты фазового перехода воды с помощью простейших и надежных технологий, наносящих минимальные нарушения окружающей среде. Данная технология подходит для всей территории России, особенно для регионов суровыми климатическими условиями.

ПАЛЕОЗООЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕГИОНА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Кузнецова Т.В.[1], Ширмейстер Л.[2], Тумской В.Е.[3], Веттерих С.[2], Маттес Х.[5], Гроссе Г.[2]

[1] МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва;
[2] Институт полярных и морских исследований им. А. Вегенера, Потсдам, Германия,;
[3] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
tatkuz2012@mail.ru

Одним из направлений исследований российско-германского проекта «Система моря Лаптевых» и последующих совместных проектов в период с 1998 по 2020 гг. являлось восстановление наземных условий окружающей среды в плейстоцене и голоцене. Разработанная методика сбора и изучения ископаемых остатков крупных млекопитающих из сильнольдистых пород ледового комплекса (ЛК) позволила дать максимально полную палеозоологическую характеристику известных обнажений арктического побережья: Мамонтовый Хайата (Быковский п-ов), Кондратьевская едома (Ойогосский яр) и Зимовье (о. Большой Ляховский). Во время полевых работ в 1998, 1999, 2002, 2007 и 2014 годах всеми участниками экспедиций собирались все костные остатки различной сохранности, которые позже определялись. Это позволило восстановить процентное соотношение видов крупных млекопитающих мамонтовой фауны, обитавших на данной территории. Основной задачей при сборе материала являлась фиксация места находки каждого образца, по точности привязки к обнажению образцы разделялись на группы: образцы собранные *in situ*, с костных полей, с термотеррас, берега и т.д. Проводилось обширное радиоуглеродное датирование костных остатков. Это также позволило дать максимально полную палеозоологическую характеристику отложений.

Мамонтовый Хайата (Быковский п-ов). В целом из района обнажения коллекция включает 1191 экземпляр. С самого обнажения, берега под ним и косы рядом собрано 930 образцов (Кузнецова и др., 2019). Преобладают остатки *Mammuthus primigenius* – 37,4%, *Equus* ex gr. *caballus* – 23,1%, *Rangifer tarandus* – 13,1%, *Bison priscus* – 9,2%, *Lepus* sp. – 8,3% и *Ovibos moschatus* – 2,0%.

С обнажения и берега под ним сделано 65 ^{14}C датировок, 20% из них имеют неконечные даты. Известно, что осадконакопление в районе Мамонтовый Хайата шло без перерывов от 60 тыс. л. н. до 7,5 тыс. л. н. (Schirrmeister et al., 2002). Однако распределение костных датировок по разрезу не однородно. Их основное количество попадает в интервал от 36 до 12,5 тыс. л. н., а максимум приходится на период от 36 до 23 тыс. л. н. Это был конец периода “теплой” тундростепи с сухим и теплым летом (48–34 тыс. л. н.) и следовавший за ним период “прохладной” тундростепи (34–23,5 тыс. л. н.) с летом, которое было теплее, чем в настоящее время на данной территории, но холоднее, чем в предыдущую эпоху (Sher et al., 2005; Кузнецова и др., 2019).

Кондратьевская едома (Ойогосский яр). Коллекция костных остатков с обнажений всего Ойогосского яра насчитывает 1925 образцов. С обнажения Кондратьевской едомы и берега под ним собрано 843 костных остатка (Kuznetsova et al., 2022). Преобладают остатки *Mammuthus primigenius* – 40,9%, *Rangifer tarandus* – 18,6%, *Equus* ex gr. *caballus* – 18,0%, *Bison priscus* – 17,7% и *Ovibos moschatus* – 4,3%. Остатков *Lepus* sp. очень мало, всего 3 кости (0,4%). С Кондратьевской едомы по костным остаткам сделано 28 ^{14}C датировок, из которых 8 неконечные. Большое количество (28,6%) неконечных дат, вероятнее всего, указывает на особенности строения обнажения, в нижней части которого присутствуют отложения возрастом более 50 тыс. л. Следует отметить, что 7 дат моложе 32,2 тыс. л. н. и моложе верхней возрастной границы отложений ЛК Кондратьевской едомы. Эти даты могут свидетельствовать о существовании отложений сартанского возраста, не выявленные до сих пор на обнажении.

Обнажение Зимовье (о. Большой Ляховский). Коллекция с южного берега о. Бол. Ляховского в районе устья р. Зимовье включает 1108 образцов (Kuznetsova et al., under review). С западной части обнажения и берега под ним собрано 423 костных остатка. Среди них преобладают остатки *Equus* ex gr. *caballus* – 22,7%, *Mammuthus primigenius* – 22,5%, *Rangifer tarandus* – 22,5%, *Bison priscus* – 18,9%, *Ovibos moschatus* – 5,0% и *Lepus* sp. – 4,5%. По костным остаткам с этой части обнажения получено 43 ^{14}C датировки, из которых 14 – неконечные. Большое количество (32,6%) неконечных дат, также как и на Ойогосском яру, указывает на присутствие в разрезе отложений старше 50 тыс. л. Максимальное количество дат находится в интервале 43,5 – 20 тыс. л. н. Это распределение говорит о благоприятных условиях существования крупных млекопитающих в каргинское время - «теплый», «прохладный» периоды тундростепи (48 – 23,5 тыс. л. н.) (Sher et al., 2005) и в начале сартанского времени. Возможно, из-за меньшего количества датировок, мы получаем более усредненную картину распределения крупных млекопитающих на о-ве Бол.

Ляховском, либо из-за более северного расположения территории, чем Быковский п-ов, количество крупных животных, обитавшие на ней, не сильно варьировало. Интересно, что по костям было получено 7 дат в интервале 30 – 12 тыс. л. н., тогда как отложения этого возраста не были выделены (Schirrmeister et al., 2002), также как и на Кондратьевской едоме. Позднее отложения сартанского возраста на обнажении Зимовье были найдены (Wetterich et al., 2021).

Анализируя данные по видовому составу остатков млекопитающих с Мамонтовой Хайаты, Кондратьевской едомы и обнажения Зимовье можно сделать некоторые выводы. Мамонтов на Быковском п-ове и Ойогосском яре было примерно в два раза больше, чем лошадей, тогда как на о-ве Бол. Ляховском мамонтов было существенно меньше и практически столько же, сколько и лошадей. Вероятнее всего, для мамонтов там были не очень благоприятные условия.

Таблица 1.

Виды	Мамонтовый Хайата	Кондратьевская едома	Зимовье (западная часть)
Mammuthus primigenius (Blumenbach, 1799)	37,4%	40,9%	22,5%
Equus ex gr. caballus L., 1758	23,1%	18,0%	22,7%
Rangifer tarandus L., 1758	13,1%	18,6%	22,5%
Bison priscus (Bojanus, 1827)	9,2%	17,7%	18,9%
Ovibos moschatus (Zimmermann, 1780)	2,0%	4,3%	5,0%
Lepus sp.	8,3%	0,4%	4,5%

Район пролива Дмитрия Лаптева отличается присутствием большого количества бизонов, тогда как на Быковском п-ове их было в 2 раза меньше. Такая же тенденция свойственна и северным оленям. В целом, копытных в мамонтовой фауне на южном берегу о-ва Бол. Ляховский было в 2 раза больше (без учета данных по северному оленю), чем на двух других рассматриваемых территориях. Резкие отличия выявлены в количестве зайцев, живших на этих территориях. По количеству остатков *Lepus* sp. – четвертое по значимости животное в коллекции с Мамонтовый Хайаты, т.е. он был очень распространен на территории современного Быковского п-ова. На южном берегу о-ва Бол. Ляховский его было несколько меньше, но все равно много, тогда как на Ойогосском яру находки остатков зайцев единичны.

Методически правильные сбор и датирование ископаемых остатков млекопитающих мамонтовой фауны позволяют давать максимально полную палеозоологическую характеристику обнажениям ледового комплекса, восстанавливать соотношение наиболее массовых представителей мамонтовой фауны на различных территориях.

Кузнецова, Т. В., Тумской, В. Е., Ширмайстер, Л., Веттерих, С. Палеозоологическая характеристика поздненеоплейстоценовых – голоценовых отложений Быковского полуострова (Северная Якутия). Зоологический журнал. 2019. Т. 98. С. 1268–1290.

Kuznetsova, T.V., Wetterich, S., Matthes, H., Tumskoy, V.E., Schirrmeister, L. Mammoth fauna remains from late Pleistocene deposits of the Dmitry Laptev Strait south coast (northern Yakutia, Russia). Frontiers in Earth Science. 2022. V. 10. Art. N 757629.

Kuznetsova, T. V., Wetterich, S., Tumskoy, V. E., Matthes, H., Schirrmeister, L. The Mammoth fauna of Bol'shoy Lyakhovsky Island (New Siberian Archipelago, eastern Siberia). Arctic, Antarctic, Alpine Research. (under review)

Schirrmeister, L., Siegert, C., Siegert, C., Kuznetsova, T., Kuzmina, S., Andreev, A., Kienast, F., Meyer, H., Bobrov, A. Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the arctic region of northern Siberia. Quaternary International. 2002. V. 89. P. 97-118.

Sher, A. V., Kuzmina, S. A., Kuznetsova, T. V., Sulerzhitsky, L. D. New insights into the Weichselian environment and climate of the East Siberian Arctic, derived from fossil insects, plants, and mammals. Quaternary Science Reviews. 2005. V. 24. P. 533-569.

Wetterich, S., Meyer, H., Fritz, M., Mollenhauer, G., Rethemeyer, J., Kizyakov, A., Schirrmeister, L., Opel, T. Northeast Siberian permafrost ice-wedge stable isotopes depict pronounced Last Glacial Maximum winter cooling. Geophysical Research Letters. 2021. V. 48. e2020GL092087.

ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ УСЛОВИЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НЕРАСЧЛЕНЁННЫХ БАЙДАРАЦКИХ И ОЛЕНЬИХ ПЕСКОВ С ПЛАСТОВЫМИ ЛЬДАМИ

Кузякин Л.П.[1], Стрелецкая И.Д.[1], Макшаев Р.Р.[1], Самохвалов Н.Д.[1], Кречетов П.П.[1], Терская Е.В.[1], Белова Н.Г.[2], Кисляк У.А.[1]

[1] МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

[2] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень

kuziakin@geogr.msu.ru

Восстановлению палеогеографических условий в районе Байдарацкой губы (Карское море) посвящён обширный ряд исследований. Вплоть до настоящего времени идёт дискуссия о генезисе местных четвертичных отложений. Значительное внимание уделяется оскольчатым глинам и валунным суглинкам (диамиктонам), вскрывающимся в основании береговых обрывов на участке Марре-Сале и вблизи устья реки Оюяхи (Уральский берег). Часть исследователей относит их к «карской морене», другая часть считает их отложениями морской трансгрессии. Также активно развивается дискуссия о генезисе пластовых льдов, залегающих в разрезах на обоих берегах Байдарацкой губы на контакте глин с перекрывающими отложениями и внутри их. Гляциалисты относят линзы пластовых льдов к реликтам оледенения, некоторые исследователи считают их преимущественно внутригрунтовыми образованиями.

При этом сравнительно мало внимания уделяется отложениям, перекрывающим пластовые льды. В большинстве работ даётся их обобщённая характеристика: например, нерасчленённые аллювиальные, озёрно-болотные, эоловые пески и супеси. В ряде публикаций данные отложения называют Байдарацкими или Оленьими песками. В рамках данного исследования предпринята попытка на основании литолого-геохимического анализа разделить и установить генезис песчаных и супесчаных отложений, перекрывающих пластовые льды в разрезах на берегах Байдарацкой губы.

В 2022 и 2024 годах сотрудниками лаборатории геоэкологии Севера МГУ имени М.В. Ломоносова (Н.Г. Беловой и Л.П. Кузякиным) было проведено полевое криолитологическое описание разрезов с пластовыми льдами и отбор образцов отложений на участках Марре-Сале и вблизи устья р. Оюяха. Для отобранных образцов был определён гранулометрический состав с использованием лазерного измерителя частиц Fritsch Analysette 22 и валовое содержание элементов методом рентгено-флуоресцентного анализа (XRF Delta Premium (Innov-X)).

На Уральском берегу Байдарацкой губы разрез характеризует отложения террасы высотой 25-40 м в 2 км к северо-западу от устья р. Оюяха. Мощность отложений от поверхности до кровли пластового льда составляет 5 м. Горизонты, относимые к Байдарацким пескам, начинаются с глубины 0,9 м. Они перекрыты горизонтами серого суглинка, мощностью 2-5 см со следами криотурбации, жёлтых слоистых песков и оторфованной коричневой супеси, являющихся частью сезонно-талого слоя в современных условиях. Большая часть отложений представлена горизонтально-слоистыми серыми пылеватыми песками. Все мёрзлые литофации имеют массивную криотекстуру. На глубине с 2,1 до 2,6 м – серый горизонтально-слоистый суглинок, переходящий в горизонтально-слоистую оторфованную супесь. Имеется несколько горизонтов с включениями гравия (например, пески на глубине 3,4 – 3,8 м). В нижней части (ниже 3,8 м), над кровлей пластового льда, наблюдаются косослоистые пески. По литологическому составу выделено 7 литофаций. Источниками материала для исследованных отложений являются горные породы основного, среднего и реже кислого составов, приносимые водными потоками с северных участков Полярного Урала. В составе крупных фракций (гравий) преобладают породы (габбро) основного состава. Сочетания текстурных, структурных и геохимических характеристик исследованных отложений позволяют предположить озерно-речной режим осадконакопления. Литофации, отнесённые к озёрным условиям осадконакопления, характеризуются повышенными концентрациями Al, Fe, Ti, Mn, Ca, Rb и Zn. Речные (аллювиальные) условия маркируются максимальным содержанием Si, Mg и минимумами концентрации Ca, Rb и Sr.

Разрез на Ямальском берегу Байдарацкой губы расположен в районе геокриологического стационара Марре-Сале в отложениях третьей морской террасы высотой 25-40 м. С глубины 0,9 м до 12,0 м (кровля пластового льда) залегает толща песчаных пылеватых отложений, содержащая повторно-жильные льды, кровля которых обнаруживается на глубине 4,0 м. Пески желтовато-светло-серые, имеют различную слоистость (горизонтальную и волнистую). С глубины 4,0 м происходит фациальный переход, выраженный появлением в песчано-алевритовых слоях тонких прослоев с темно-серой органикой. С глубины 7 м и до 12 м в составе отложений начинают преобладать алеврито-глинистые фракции. В данной 12 м толще выделяется 4 литофации. Литологический и геохимический анализы верхней толщи (от 0,9 до 2 м) показали, что эти отложения накапливались в условиях небольшого озерного водоема с периодическим влиянием речных потоков. Эта толща

выделяется по содержанию Ti и Ca. С глубины 2,5 м происходит резкое повышение концентрации Si и одновременно снижение Al, Ca и Fe. Наибольшие флуктуации геохимических элементов характерны для толщи горизонтально-слоистых и волнистых алевритов и песков (глубина 3-4,5 м). По литологическому и элементному анализам можно предположить, что накопление данной толщи, происходило условиях неглубоких озер и активном участии ветрового переноса частиц. Алеврито-глинистые отложения, залегающие ниже 4,5 м и до 12 м накапливались в озерных и речных условиях. На озерные условия осадконакопления указывают преобладание алеврито-глинистых фракции, горизонтально-слоистая текстура, прослои с органикой и повышенные значения Al, Ti, Fe, Ca, Zn. Отложения, накапливавшиеся в речных условиях, характеризуются волнистой слоистостью и преобладанием песчано-алевритовых фракций, а также повышенными значениями Si и низкими концентрациями Al, Ti, Fe, Ca, Zn.

Литолого-геохимический анализ четвертичных отложений, слагающих два противоположных берега Байдарацкой губы, позволил верифицировать возможные условия их осадконакопления. Для отложений, накапливавшихся, в озерных и речных условиях есть определенные сходства в литологическом и элементном составах. В озерных отложениях преобладают алеврито-глинистые фракции и повышенные значения Al, Fe, Ti и Ca. Отдельно можно выделить элемент Zn, максимальные концентрации, которого приурочены к озерным условиям накопления отложений. Речные условия осадконакопления на исследованных участках характеризуются преобладанием Si и существенно пониженными концентрациями Al, Fe, Ti, Ca и Zn. Несмотря на относительную удаленность участков исследований, в них можно выделить определенное сходство в литолого-геохимическом составе в нескольких литофациях. В тоже время, в разрезе Уральского берега Байдарацкой губы, литологическое строение характеризуются более разнообразными условиями осадконакопления. Например, включения крупных линз с гравием и дресвой указывают на близкий источник материала, поступавшего с Полярного Урала.

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания №121051100167-1 «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики (ГЗ)».

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЮГО- ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КУЛАРСКОГО ХРЕБТА (УЧАСТОК КЮЧУС)

Мисайлов И.Е.
ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
ventura-83@mail.ru

Впервые на основе геотермических исследований в глубоких скважинах дана характеристика геотемпературного поля и определена мощность толщи многолетенемерзлых пород в пределах участка Кючус Усть- Янского района.

Введение. Территория месторождения «Кючус» находится на севере Усть- Янского района Республики Саха (Якутия) за Полярным кругом, в нижнем течении руч. Кючус, левого притока реки Яны (Мурзин, 2007). Золоторудное месторождение «Кючус» является вторым по величине в Республике Саха (Якутия), после Нежданинского золоторудного месторождения, но превосходит последнее по содержанию золота в два раза, незначительно уступая по запасам (Сидорова, 2022).

Геокриологическая изученность. Согласно геокриологической карте СССР (1996) и монографии Геокриология СССР (1989) в районе исследований многолетнемерзлые породы развиты повсеместно и характеризуются сплошным распространением и мощностью от 400 до 500 м.

В 1996 году по данным предварительной разведки на месторождении Кючус и поисково-оценочных работ на флангах, по данным бурения и каротажных исследований была дана оценка мощности многолетнемерзлых толщ, которая составила от 400 м - в долине ручья до 495 м - на водоразделе. Температура пород на глубине годовых теплооборотов (20 м) изменялась от -1,9 до -6,0 °С, а величина геотермического градиента варьировала от 1,6 до 2,3 °С\100м (Хизбулин, 1996).

Результаты геотермических исследований. Сотрудниками Института мерзлотоведения СО РАН на месторождении Кючус были проведены мерзлотно-геотермические исследования, в том числе температурные измерения в пяти (пробуренных в конце 1990-х годов) разведочных скважинах до глубины 250 м.

По данным полученных измерений установлено, что наиболее низкие температуры горных пород на подошве слоя годовых теплооборотов (20 м) - 10, 0 °С были отмечены в долине р. Кючус (абсолютные отметки 74 – 76 м, см рис. 1 скв.332, 299). В пределах бортов долины (абсолютные высоты 100-113 м) температура пород изменялась от -8,4 до -8,6 °С. (рис. 1, скв. № 352, 110, 142).

Наиболее высокие температуры пород (-6,8 - - 6,6 °С) были отмечены на склоне юго- западной экспозиции с абсолютными отметками 124,4 и 118,1м (рис 1, скв. №138 и скв. №130). Температура на глубине 200 метров изменялась от – 5,1 до – 5,3°С. Градиент температуры пород в интервале глубин 80-250 м варьировал от 1,8 до 2,2 °С/100м.

Используя данные полученных геотермических исследований, учитывая теплофизические свойства разреза горных пород была дана оценка мощности ММТ, величина которой изменяется от 460 до 500 м.

В 2023 г. на месторождении проведено бурение глубоких (до 800 м) геологоразведочных скважин. В этом же году были проведены мерзлотно-геотермические исследования. В весенний период проведены геотермические исследования и оборудование стационарными термогирляндами, до глубины 650 две скважины, расположенные в долине р.Кючус. (см.рис. 1; скв. 4560-2, абс. отм. 64 м) и на водораздельной части междуречья р. Кючус и р. Аммонитный (см. рис.1; скв. 2960-1, абс. отм. 125м.). Осенью были проведены повторные измерения температуры в стволах вновь оборудованных и старых разведочных скважинах.

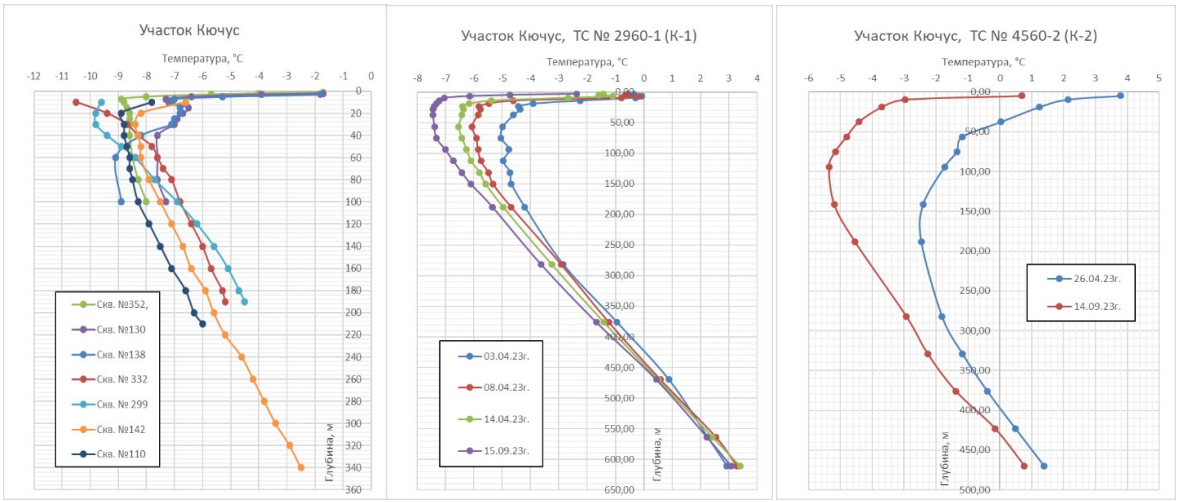


Рис. 1. График изменения температуры горных пород участка Кючус.

Анализ результатов геотермических наблюдений. В результате выполненных геотермических исследований установлено, что многолетнемерзлые толщи в пределах месторождения Кючус имеют нестационарной тепловой режим, отражающий повышение температуры пород верхней части разреза и начальный период деградации многолетнемерзлых толщ. Этот процесс связан с современным периодом потепления климата за последние 50 лет.

В результате выполненных геокриологических исследований на участке Кючус установлено, что:

- температура пород на водораздельной части на глубинах: 20, 100 и 450 м: -7,3 ˚С; -6,9 ˚С и 0,0 ˚С, тогда как в долине на тех же глубинах она составляет -3,7 ˚С; -5,3 ˚С и 0,4 ˚С соответственно;
- мощность многолетнемерзлой толщи варьирует от 430 м - в долине р. Кючус до 450 м на водораздельной части;
- величина геотермического градиента в мерзлой толще изменяется от 1,67 до 1,83 ˚С/100 м, а в подмерзлотных горизонтах в зависимости от состава пород от 1,81 до 1,90 ˚С/100 м.

Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2500000/ под ред. Э.Д.Ершова, Винница.: Картпредприятие,1996.

Геокриология СССР. Средняя Сибирь // под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989, С 278-303.

Мурзин Ю. А., Нерадовский Л. Г., Гаврильев Р. И. Исследования геокриологических условий месторождения Кючюс. г. Якутск, ИМЗ СО РАН им. П. И. Мельникова, 2007.

Сидорова Н. В., Волкова А. В., Ковальчук Е. В., Минервина Е. А., Левицкая Л. А. «Невидимое золото» и другие элементы- примеси в пирите и арсенопирите вкрапленных руд месторождения Кючус (Республика Саха (Якутия) // Геология руд. месторождений. 2022. Т. 64. №5. С. 451–461.

Хизбулин М.В. и др. Отчёт о результатах предварительной разведки 1 очереди золоторудного месторождения Кючус и поисково-оценочных работ на флангах золоторудного месторождения Кючус 19887-1996 г.г. (подсчёт запасов по состоянию на 01.03. 1996г) пос. Батагай, ГУГГП «Янгеология», 1996.

МОДЕЛЬНЫЙ РЕАНАЛИЗ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА БУГРИСТЫХ И ПОЛИГОНАЛЬНЫХ БОЛОТ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Морозов А.П., Анисимов О.А.
ФГБУ «ГГИ»
antonmorozov43@yandex.ru

Болота играют важную роль в углеродном цикле и оказывают заметное влияние на освоение нефтегазоносных районов. В период с 1971 по 1991 г. проводились наблюдения на 10 болотных стационарах криолитозоны Западной Сибири. Нами были проведены модельные расчеты температуры торфяной залежи, мощности СТС и уровня надмерзлотных вод за этот и последующий период до 2023 г. Использовалась модифицированная модель CrioGrid (Westermann et al., 2023), на входе которой задавались данные реанализа ERA5 по 8 метеорологическим показателям суточной дискретности. Сравнение с наблюдениями показало, что стандартная ошибка расчётов составляет 3,2 см для мощности СТС и 0,8°С для среднегодовой температуры торфяной залежи на глубине 20 см.

Расчеты проводились за период 1984-2023 г. Они показали, что в целом за 40-летний период тренды мощности СТС и температуры торфяной залежи на глубине 10 см повсеместно положительны, Были также рассмотрены изменения за два 20-летних периода до и после 2003 г. В первый из них в южной части криолитозоны наблюдались наибольшие положительные тренды температур торфяной залежи до 0,60 °С/10 лет. В северной части тренды были разнонаправлены, от -0,68 до 0,35 °С/10 лет. В 2004-2023 гг температурные тренды почти повсеместно положительные, от небольших величин на юге до 1,09 °С/10 лет на севере. Анализ показал, что пространственная и временная изменчивость трендов температуры торфяной залежи соответствует изменениям температуры воздуха, осредненной за теплый период.

Тренды мощности СТС многолетнемерзлых болот повсеместно положительны и составляют за весь период от 3,2 до 7,2 см/10 лет. Их пространственное распределение в наибольшей степени зависит от температуры воздуха, при этом играет роль и уровень надмерзлотных вод.

Тренды уровней надмерзлотных вод разнонаправлены и в большей степени зависят от атмосферных осадков. Уровни вод за последние 20 лет быстрее всего растут на Гыданском полуострове (до 2,7 см/10 лет), а падают в бассейнах рек Надым и Пур (до -3,6 см/10 лет). На остальных территориях абсолютные величины трендов не превышают 0,9 см/10 лет.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в настоящее время происходят заметные изменения гидротермического режима мерзлых болот на севере Западной Сибири, которые нужно учитывать при планировании освоения заболоченных территорий.

1. The CryoGrid community model (version 1.0) – a multi-physics toolbox for climate-driven simulations in the terrestrial cryosphere / S. Westermann, T. Ingeman-Nielsen, J. Scheer et al. // Geoscientific Model Development. – 2023. – Vol. 16. – № 9. – P. 2607-2647.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА МЕРЗЛЫХ ПОРОД ПОЛЮСА ХОЛОДА СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ С УЧЕТОМ СЦЕНАРИЕВ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Платонов И.А.[1,2,3], Сысолятин Р.Г. [1]
[1]Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
[3]Арктический и Антарктичекий научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург
platonovignat@yandex.ru

Экстремально теплая зима 2024-2025 гг. характеризуется отрицательными температурными аномалиями для «полюса холода» Северного полушария. Тем не менее, на м/с Делянкир и Оймякон (пос. Томтор) с 1950 г. фиксируется планомерное повышение среднегодовых температур воздуха, что вызывает изменение характеристик мерзлых пород. Во второй половине XX в. температура пород Оймяконского плоскогорья составляла -6,9…-8°С, тогда как в настоящее время по данным наблюдений 2021–2024 гг. она не превышает -6,56°С (на глубине 1,6 м). Для прогноза дальнейших изменений геокриологических условий выполнено одномерное моделирование теплового режима мерзлых пород в ПО “QFrost” с учетом климатических сценариев SSP245 и SSP585.

Моделирование теплового режима мерзлых пород производилось в 4 этапа:

Этап 1. Создание цифрового аналога скважин Томтор и Делянкир в интерфейсе ПО “QFrost”. Подбор теплофизических параметров грунта на основе полевых и лабораторных данных с использованием нормативных документов и литературных источников Обработка метеоданных (среднемесячные температуры воздуха и толщины снежного покрова) для задания граничного условия 3-го рода на границе грунт-воздух. Использовались данные с метеостанций Росгидромета Делянкир и Оймякон, к которым приурочены термометрические скважины. Рассчитаны среднемесячные температуры воздуха для опорных точек, среднемесячные мощности снежного покрова (с 1950 г.)., исходя из которых вычислены значения коэффициента теплообмена поверхности пород с покровами α [Вт / (м3 * К)].

Этап 2. Калибровка модели с использованием ряда наблюдений термометрических скважин Томтор и Делянкир, на которых ведутся наблюдения с 2021 г. Благодаря корректировке коэффициента α, максимизирована сходимость фактической температурной кривой и модельной (использованы усредненные фактические температурные кривые на конец периодов промерзания и протаивани, которые сопоставлялись с моделируемыми кривыми).

Этап 3. Вычисление годовых трендов повышения температуры воздуха для двух климатических сценариев, взятых из проекта CMIP6: SSP245 и SSP585 с использованием климатической модели MIROC6. R^2 для рядов среднемесячных температур в период 1950 по 2014 гг. для м/с Оймякон и моделируемых температур для этой же точки составил 0,48 для летних и 0,16 для зимних месяцев соответственно. Для м/с Делянкир R^2 составил 0,69 и 0,18 для летних и зимних месяцев. Такие низкие значения R^2 вызваны завышенными зимними «экстремальнымие» температурами модели. После использования метода EQM (Empirical quantile mapping) R^2 составил 0,88 и 0,81 для м/с Оймякон, 0,86 и 0,82 для м/с Делянкир. К климатическим сценариям применен метод Pruned Exact Linear Time (PELT) для разделения временных рядов температур (с 2024 до 2100 гг.) на отрезки с максимальным R^2 для линейной аппроксимации. Для сценария SSP245 выделено два отрезка (2024–2058, 2059-2100), для SSP585 — три (2024–2053, 2054–2083, 2084-2100). Отрезкам SSP245 соответствовали тренды 0,047, 0,044 °С/год (Томтор), 0,050, 0,044 (Делянкир); SSP585 — 0,087, 0,123, 0,176 °С/год (Томтор), 0,091, 0,117, 0,150 °С/год (Делянкир). Полученные тренды вносились в граничные условия.

Этап 4. Запуск симуляции модели с учетом температурных трендов, регистрация полученных температур пород на глубинах с шагом 0,05 м.

Результаты. По сценарию SSP245 к 2059 г. температуры пород на глубине 30 м для обеих точек поднимутся до -5,76°С (в 2024 г. они составляли –6,5°С и –6,7°С на скв. Томтор и Делянкир). Мощность сезонно-талого слоя (СТС) не превысит 1,05 м и 0,75 м (в 2024 г. она составляла 1 м и 0,6 м) . К 2100 г. температура на глубине 30 м повысится до –5,37°С и –5,39°С, мощность СТС составит 1,1 м и 0,75 м.

По сценарию SSP585 к 2054 г. температура пород на глубине 30 м в Томторе поднимется до –5,52°С, в Делянкире — до –5,45°С, больше чем на 1°С относительно 2024 г. Мощность СТС на этих точках составит 1,1 м и 0,85 м соответственно. К 2083 г. температура вырастет до –4,68°С и –4,60°С, СТС — до 1,3 м и 0,9 м соответственно. К 2100 г. температура пород на глубине 30 м для Томтора останется практически неизменной и будет равна –4,64°С. Для точки Делянкир температура на глубине 30 м несколько опустится и составит –4,71°С. Мощность СТС в точках составит 1,2 м и 0,8 м соответственно.

Заключение. Полученные результаты моделирования теплового режима мерзлых пород говорят об некритическом характере увеличения мощности СТС и температуры пород в ответ на потепление климата в рассматриваемый период как по «пессимистичному» сценарию SSP585, так и по «умеренному SSP245. Прогнозируется небольшое увеличение мощности СТС (на 0,2 – 0,3 м для Томтора, 0,2 м для Делянкира). Температура пород может повыситься более чем на 2°С, однако ее значения все еще достаточно далеки от температуры фазового перехода лёд–вода.

При самом «пессимистичном» сценарии температура пород в точке Делянкир несколько понижается. Вероятно, это реакция на более низкие температуры воздуха, которые были ранее. Стоит отметить, что более выраженная реакция мерзлоты на прогнозируемое потепление будет после рассматриваемого периода.

GROUND HEAT FLUX INTO PERMAFROST AS AN INDICATOR OF PERMAFROST DEGRADATION

Romanovsky V.E.[1], Nicolsky D.J [1], Wright T. C. [1], Cable W.L.[2]
[1] University of Alaska Fairbanks, Geophysical Institute, Fairbanks, Alaska, 99775, USA, veromanovsky@alaska.edu
[2]Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Telegrafenberg A45, 14473 Potsdam, Germany

Climate warming promotes an increase in the permafrost temperature and active layer thickness, which in turn effect the stability of northern ecosystems, threaten infrastructure and cause the release of carbon dioxide and methane into the atmosphere. The timing and rate of permafrost degradation are two of the major factors in determining the anticipated negative impacts of climate warming on the Arctic ecosystems and infrastructure. The results of almost 40 years of permafrost and active layer temperature observations along an Alaskan Permafrost-Ecological Transect show that most of the sites in Alaska show substantial warming of permafrost since the 1980s. The magnitude of warming has varied with location, but was typically from 0.5 to 4°C. By 2020, new record highs for the entire period of temperature measurements at 15 and 20 m depth were recorded at all locations (Figure 1). However, this warming was not linear in time and not spatially uniform. One of the best quantitative indicators of the near-surface permafrost warming/cooling and thawing/freezing is the net amount of ground heat flux entering into permafrost through its upper boundary within a year. There are several methods how this amount may be measured or modeled. Placing a high-quality heat flux plate in the permafrost close to its upper boundary is the direct method to measure the energy balance in the top permafrost layer. An indirect method to estimate the average long-term heat flux into permafrost uses the upper permafrost as a calorimeter. Finally, the amount of heat entering into near-surface permafrost can be calculated using a well-calibrated permafrost thermal model. The examples of application of each of these methods to estimate the permafrost stability will be presented and the advantages and disadvantages of each method will be discussed.

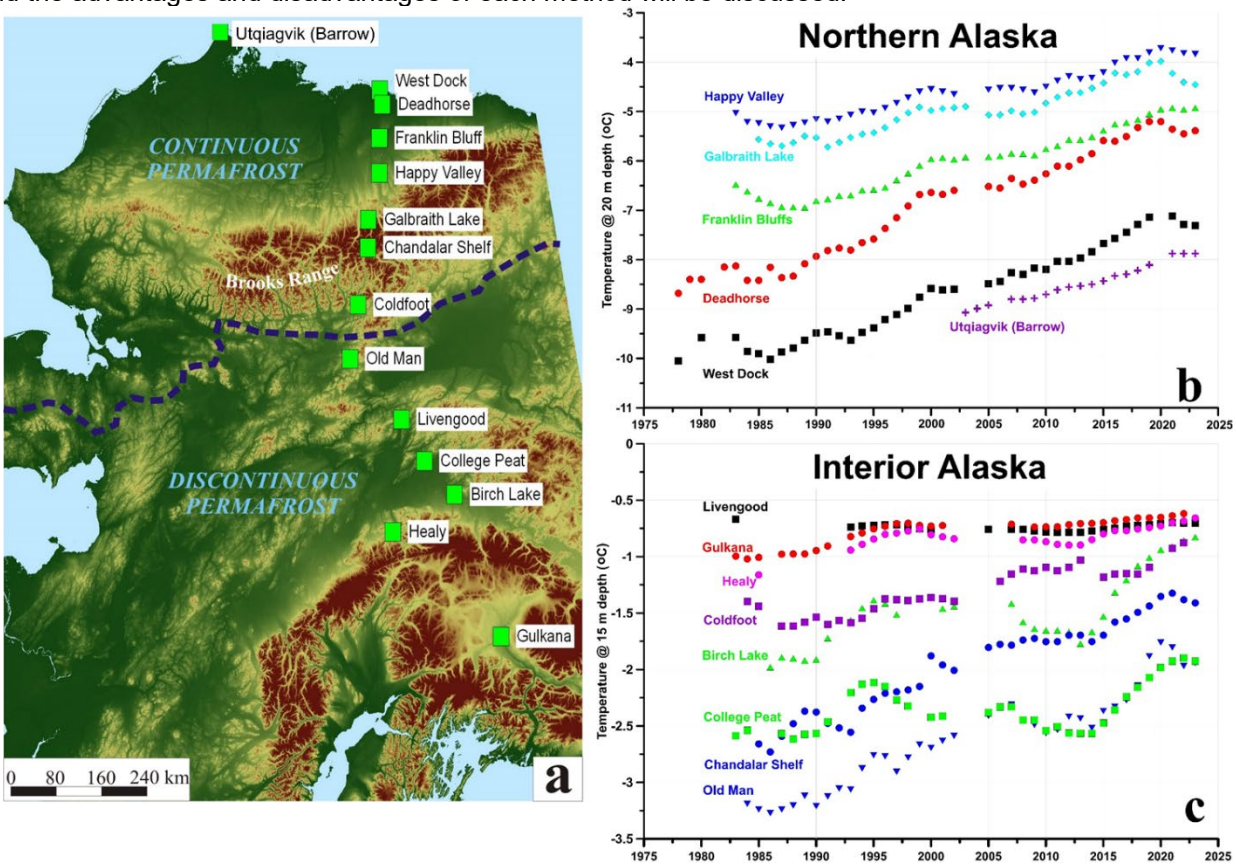


Fig. 1. Continuous and discontinuous permafrost zones in Alaska (separated by the broken blue line) and location of a north-south transect of permafrost temperature measurement sites (a); time series of mean annual temperature at depths of 20 m (b) and 15 m (c) below the surface, respectively, at the measurement sites.

ВЛИЯНИЕ ПОКРОВНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ НА ЗОНУ СТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ АРКТИКИ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Смирнов Ю.Ю.[1,2], Матвеева Т.В.[1]
[1] ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург
[2] РГГМУ, Санкт-Петербург
y.y.smirnov@mail.ru

Вопрос о распространенности субаквальных многолетнемерзлых пород (СММП) на Евразийском шельфе Арктики является предметом активного обсуждения в последние десятилетия, по мере продвижения на север антропогенной деятельности и связанных с нею рисков для экосистем и климата, основными из которых являются деградация СММП и ассоциированной с ними зоны стабильности гидратов природного газа (ЗСГГ), что может стать одной из причин интенсификации эмиссии метана в атмосферу, что в свою очередь ведет к усилению т.н. «глобального потепления». Фактических данных по распределению СММП на шельфе Российской Арктики крайне мало. Как показали сейсморазведочные и буровые работы последних лет [Богоявленский и др., 2023], имеющиеся результаты моделирования СММП [Смирнов и др., 2024] имеют расхождение с фактическими данными для центральной части моря Лаптевых, что означает необходимость учета дополнительных факторов в задаче теплопроводности.

Поскольку главным определяющим фактором для условий на верхней границе задачи теплопроводности является продолжительность субаквальных и субаэральных эпох, основной целью в данной работе стал учет гляциоизостатического вклада Евразийского ледяного щита в формирование, эволюцию и современное распределение СММП и ЗСГГ на шельфе Арктики.

Модель основывается на решении по неявной разностной схеме методом сквозного счета одномерного нестационарного уравнения теплопроводности:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial z}\right) \#(1)$$

где ρ – плотность морских отложений, C – теплоемкость морских отложений, λ_e – эффективный коэффициент теплопроводности морских отложений. В качестве начального распределения температуры задавался профиль, полученный по решению стационарной задачи.

Равновесное давление (P_{eq}, МПа) гидратообразования определялось согласно [Moridis, 2003]:

$$ln\ ln\left(P_{eq}\right) = \sum_{i=0}^{5} a_n (T + T_D)^n \#(2)$$

Коэффициенты a_n для гидратов метана представлены в соответствующей статье [Moridis, 2003].

Для учета изменений уровня моря в каждом узле расчетной сетки, вместо использования одной региональной реконструкции в данной работе была использована последняя версия палеоклиматической модели ICE-7G_NA [Roy, Peltier, 2017] представленная в виде архивов NetCDF относительного изменения топографии и вклада гляциоизостазии.

Задача решалась для двух начальных сценариев: «теплом» (при использовании субаквальных условий в стационарной задаче) и холодном (при использовании субаэральных условий. Результаты расчета при учете локальных колебаний уровня показывают, что при «тёплом» сценарии стационарной задачи СММП на шельфе могут иметь весьма скромное распространение, и их площади при прогнозировании в «холодных» сценариях могут быть завышены в несколько раз. Результат решения «холодной» задачи показывает хорошую сходимость с результатами натурных геолого-геофизических изысканий. В обеих сценариях прогнозируется практически полное раскрытие Печорского и Чукотского моря от СММП к настоящему моменту времени, За исключением указанных морей, в обеих сценариях прогнозируется широкое распространение ЗСГГ практически по всему шельфу. Миллениальные тренды, построенные с использованием линейной регрессионной модели на сеточных узлах, где ЗСГГ и СММП продолжают существовать до настоящего времени, дают представление о самых устойчивых и динамично меняющихся областях арктического шельфа. Самые стабильные регионы, согласно модели, представлены зонами ЗСГГ, спрогнозированными по фильтрогенной модели в настоящем. Наиболее нестабильные ЗСГГ прогнозируются на периферии — вблизи границы континентального шельфа, в регионе максимальной морской регрессии, где ЗСГГ в настоящее время существует только в посткриогенной форме.

Показано, что вследствие высокой инерционности системы, ЗСГГ криогенного генезиса может существовать в настоящее время на участках, свободных от СММП. Такую ЗСГГ, по всей видимости,

для относительно глубоководных областей (50 м и более) следует считать «посткриогенной» - инициированной субэральным выхолаживанием или воздействием ледниковой массы, в настоящий момент поддерживаемой в равновесных условиях за счет повышенного давления из-за изменившегося уровня моря. В свою очередь покровное оледенение Арктики способно было инициировать возникновение другого типа ЗСГГ – «субгляциальной» и, в процессе распада ледника, «постгляциальной», сформировавшейся под ледником за счет чрезвычайно высокого давления.

1. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Распространение субаквальной мерзлоты в море Лаптевых по данным сейсморазведки методом преломленных волн // Арктика: экология и экономика, 2023, т. 13, № 4, с. 501-515

2. Смирнов Ю.Ю., Матвеева Т.В., Щур Н.А., Щур А.А., Бочкарев А.В. Численное моделирование субаквальных многолетнемерзлых пород на евразийском шельфе Арктики с учетом зональности современного климата // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 5, с. 38–59.

3. Moridis G.J. Numerical studies of gas production from methane hydrates // Society of Petroleum Engineers Journ. 2003. V. 32. № 8. P. 359–370

4. Roy, K., & Peltier, W. R. (2017). Space-geodetic and water level gauge constraints on continental uplift and tilting over North America: regional convergence of the ICE-6G_C (VM5a/VM6) models. Geophysical Journal International, 210(2), 1115-1142, doi:10.1093/gji/ggx156

ИСТОРИЯ НАКОПЛЕНИЯ И ПРОМЕРЗАНИЯ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОСАДКОВ Р. КОЛЫМЫ В ПОЗДНЕМ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНЕ И ГОЛОЦЕНЕ

Спектор В.В.[1], Холодов А.Л.[2]
[1] *Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск*
[2] *Geophysical Institute* University of Alaska Fairbanks
vvspektor@mpi.ysn.ru

Данное исследование освещает историю накопления и промерзания аллювиальной толщи низовьев р. Колымы в позднем неоплейстоцене и голоцене на основании комплексного изучения керна 22-метровой скважины, пробуренной нами в Нижнеколымском улусе РС(Я) в 2013 г.

Скважина №13/3К «Амболиха» заложена на пойменной террасе правобережья р. Колымы в 3,5 км от главного русла и в 15 км к югу от п. Черский (68°37' с.ш., 161°21' в.д., 4,5 м н.у.м.). В 100 м к востоку от участка пойменную террасу прорезает виска Амболиха. Подошва слоя сезонного оттаивания отмечена на глубине 0,58 м (01.08.2013 г.).

Рассмотренные аллювиальные отложения р. Колымы мощностью более 22 м относены нами к перстративному аллювию, накопившемуся в течение одного цикла. Наблюдается закономерное изменение дисперсности осадков от более грубых русловых галечников и песков к тонкодисперсным пойменным, смена режима с субаквального на переменный субаквально-субаэральный и, наконец, затухание осадконакопления в условиях высокой поймы. Первичным источником материала, наиболее вероятно, являются широко распространенные здесь меловые вулканогенные породы.

Формирование толщи начинается с накопления фации руслового галечника (*пачка I, инт. 22,22-21,92 м*), вероятнее всего, в начале каргинского времени позднего неоплейстоцена. Сохранившийся мерзлым один из песчаных фрагментов растепленного при бурении керна в этом интервале позволяет предположить, что в ненарушенном строении здесь преобладала массивная криогенная текстура. Между мелким галечником в гравийно-песчаном заполнителе и вышележащими песчаными отложениями (пачка II) не обнаружено следов перерыва. Напротив, переход достаточно плавный, что позволяет связать обе эти пачки в пределах одного цикла аллювиального осадконакопления.

Фация руслового аллювия (*пачка II, 21,92-15,56 м*), представленная тонкими горизонтальнослоистыми мелкозернистыми песками с линзами и прослоями аллохтонного растительного детрита, массивной криотекстурой, начала накапливаться в условиях безлесных ландшафтов с преобладанием ксерофитных травянистых ассоциаций, вероятно, характерных для холодных и сухих ритмов каргинского межледниковья. Затем холодный сухой климат стал меняться на более влажный, в это время формируется средняя часть толщи. Из этих частей пачки получены две запредельные для радиоуглеродного метода датировки более 48000 л.н., которые не противоречат отнесению осадков к верхней части каргинского горизонта.

Верхняя часть пачки продолжает накапливаться в условиях потепления климата, в которой осуществлялась существенная перестройка растительного покрова. На сухих равнинах и каменисто-щебнистых склонах существовал прерывистый покров из трав, на низких уровнях рельефа во влажных и умеренно влажных условиях произрастали осоково-злаковые сообщества. Значительные площади, вероятно, занимали кустарниковые березки, ольховник и кедровый стланик, а также вересковые. Все вышеизложенное, а также радиоуглеродная датировка 32300±570 л.н. из интервала 16,0-16,05 м, позволяют уверенно относить время накопления слоев к каргинскому межледниковью (МИС 3).

Постепенная смена режима с руслового на пойменный запечатлена в более дисперсных тонкопесчаных и алевритовых осадках *пачки III* (*инт. 15,56-9,22 м*). Слоистость тонкая, обусловленная чередованием более светлых и темных разностей алеврита и тонкозернистого песка. В нижней части характерны пятна оглеения, также отмечаются включения рассеянного растительного детрита. Криотекстура массивная с разреженными горизонтальными шлирами льда толщиной 2-3 мм, чередующимися через 4-7 см. Единичны вертикальные шлиры. Для этого времени характерна обстановка значительного похолодания на фоне нарастающей сухости климата, что привело к широкому расселению криоксерофитных травянистых и споровых группировок. Время формирования слоев отнесено к сартанскому ледниковью (МИС 2), что подтверждено радиоуглеродной датировкой 26700 ± 280 л.н. из интервала 10,03-10,07 м.

В голоцене субаквальное осадконакопление сменяется на переходный субаквально-субаэральный режим. В условиях периодически заливаемой высокой поймы формируется *пачка IV (инт. 9,22-0,9 м)*, представленная переслаиванием тонкозернистых песков и алевритов, при преобладании последних. Периодическая смена субаквального застойного и субаэрального режимов подчеркивается чередованием горизонтов оглеения с включениями вивианита и ожелезнения. В это

время происходит существенная перестройка в растительном покрове, обусловленная потеплением климата. Древесно-кустарниковые растения доминируют, расширяются пространства, занятые березняками и лиственничниками. Радиоуглеродная датировка 7510 ± 45 л.н. из интервала 2,68-2,82 м подтверждает датирование слоев из верхней части пачки временем голоценового оптимумума (атлантическая стадия).

По всей видимости, в это время начинается эпигенетическое промерзание нижележащих пачек I-III, до сих пор пребывавших в талом состоянии и проходящих стадии субаквального диагенеза. Формирование разреженной криотекстуры в пачке III характерно для медленного промерзания более влажных алевритовых осадков. В пачках I-II промерзание более плотных осадков, вероятнее всего, было достаточно быстрым, и прошло с образованием массивной криогенной текстуры присущей песчаным образованиям. По мере накопления осадков пачки IV происходило их промерзание по сингенетическому типу, с формированием характерной тонкошлировой линзовидной криотекстуры.

Ближе к концу голоцена произошел переход поймы в стадию высокой поймы с накоплением суглинистых отложений пачки V (инт. 0,9-0 м) с толсто- и тонкошлировой горизонтально-слоистой криотекстурой. В это время произрастала растительность редкостойных лиственничников с зарослями кустарников, местами с болотами, то есть близкая к современной. В субаэральном режиме, произошло формирование слоя сезонного оттаивания, началось почвообразование с сопутствующими процессами криогенеза, включая криотурбацию. На поверхности началось формирование полигонально-жильной сети с небольшими жилами льда. Скважиной (в пределах пачки IV) вскрыто несколько фрагментов ледяной жилы, изотопный состав которой (d18O mean -25,83...-26,32; d2H mean -199,41 ... – 204,47) характерен для голоценовых образований.

Исследование выполнено в рамках реализации проекта НИОКТР 122011800064-9 “Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене”.

ПОЛВЕКА КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СТАЦИОНАРЕ МАРРЕ-САЛЕ (П-ОВ ЯМАЛ). ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Стрелецкая И.Д.
МГУ имени М.В. Ломоносова А.А*., Москва*
irinastrelets@gmail.com

Геокриологический стационар Марре-Сале расположен на западном побережье Карского моря. Обрывистый высокий берег на протяжении более 4 километров интенсивно размывается и образует естественный разрез четвертичных отложений, включающий льды различного генезиса.

Ежегодные летние экспедиции геокриологов в район полярной станции Марре-Сале начались в 1972 году. Была пробурена скважина, измерена температура пород до глубины 10м, проведены первые геофизические исследования. В 1978 году Северной партией ВСЕГИНГЕО был организованы мониторинговые наблюдения за мерзлотой, создается стационар. Более 40 лет идет сбор и обобщение уникальных данных в зоне типичной тундры. Не имея постоянного государственного финансирования, этот стационар существует благодаря энтузиазму, ответственности ученых различных организаций: ВСЕГИНГЕО, Гидроспецгеологии, института Криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, МГУ, Тюменского университета, ВНИИОкеангеологии. В разные периоды работы на стационаре и в окрестностях включали комплексы геологических, геохимических, геокриологических, теплофизических, геофизических, ландшафтных и геоботанических исследований, что позволило устанавливать особенности свойств основных геокриологических характеристик (глубина СТС, температура пород, льдистость отложений и подземные льды, скорость отступания берега и др.). Близость метеостанции позволяет прослеживать изменения значений мерзлотных параметров во времени и климата. В 1995 г. была организована площадка CALM. Ежегодно результаты по измерению слоя сезонного оттаивания и температурные измерения по скважинам включаются в единые доступные международные базы данных CALM, TSP, ACD. Исследуются ландшафтная структура территории, береговые и криогенные процессы и их динамика во времени. На различных геоморфологических уровнях и прибрежной акватории пробурены скважины и измеряется температура до глубины 30 метров.

Ежегодно в состав летних экспедиций включаются студенты МГУ, которые традиционно проходят здесь научно-исследовательские и преддипломные практики, и аспиранты МГУ и РАН. Студенты участвуют в полевых исследованиях, обрабатывают и обобщают полученный материал, который использует в подготовке курсовых и дипломных работ. Защищено более 60 квалификационных студенческих работ. Создается новая генерация исследователей криолитологов и геокриологов, которые приобретает необходимые знания, навыки и компетенции для получения квалификации, закрепляя теоретические знания, полученные на лекциях.

Новые фундаментальные выводы, основанные на материалах многолетних наблюдений на стационаре сформулированы как в защищаемых положениях трех докторских и четырех кандидатских диссертаций, так и в многочисленных научных публикациях и монографиях, озвучены на российских и международных конференциях.

Установлено, что четвертичные отложения формировались преимущественно в морских условиях при неизменном источнике сноса и условий. Чередование слоев отложений разной дисперсности и большое количество органического углерода свидетельствуют о прибрежных условиях накопления. Морские отложения промерзали сразу же после выхода на поверхность, частично в условиях мелководья и осушек и сохранили седиментационную засоленность. Отложения содержат линзы криопэгов, а криогенное строение характерно для эпигенетического типа промерзания.

Выявлено, что пластовые льды разной мощности приурочены к верхней части разреза морских отложений, они генетически связаны с промерзанием морских водонасыщенных отложений и криопэгами. По условиям формирования различаются пластовые льды на контакте с перекрывающей морские отложения континентальной пачкой и залегающие в морских отложениях. В поровом пространстве морских отложений и в воздушных пузырьках в пластовых и сегрегационных льдах содержится большое количество метана биогенного происхождения, который находился в воде до промерзания. При сокращении мощности мерзлоты и повышении температуры пород, формируются криопэги, происходит дегазация толщ.

Установлено также, что метан накапливается в основании слоя сезонного оттаивания и может консервироваться верхней части мерзлых пород.

Верхняя континентальная пачка сложена аллювиально-морскими, озерными, аллювиальными и биогенными отложениями, промерзавших в эпи и сингенетических условиях. Две генерации

полигонально-жильных льдов с различными значениям изотопного состава льда и геохимическим составом позволяют использовать эти значения в палеогеографических реконструкциях. Реконструированы зимние палеотемпературы в Арктике за последние 60 тыс. лет в условиях западного переноса и уточнено положения береговой линии в начале голоцена.

Показано, что температура мерзлых пород и глубина оттаивания за последние десятилетия изменилась. Величина изменения и их тренды зависят, как от ландшафтной структуры, так и состава и льдистости пород.

Для получения и апробации достоверных фундаментальных и прикладных результатов требуются продолжительные комплексные наблюдения, набор статических данных, освоение имеющихся и внедрение новых методик. Работы на стационаре показывают, как важна преемственность при смене научных поколений и развитие научных школ в криолитологии и геокриологии.

ПРИРОДНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОСАДКУ ПОРОД В СЕЗОННОТАЛОМ СЛОЕ

Тананыкин А.А. [1], **Маслаков А.А.**[1]

[1] *МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва*

tananykinaa@my.msu.ru

Глобальное изменение климата признано мировым научным сообществом как факт, ведущий к интенсивному таянию многолетнемёрзлых пород (ММП). Это подтверждается многочисленными исследованиями, проводимыми в различных регионах планеты, таких как полуостров Чукотка, Ямал, Аляска и других частях криолитозоны. Помимо изучения температуры мерзлых пород и динамики толщины сезонноталого слоя (СТС), долгосрочные наблюдения выявили активизацию термокарстовых и термоэрозионных процессов, сопровождающихся деформацией поверхности и образованием специфических форм рельефа. Термокарст сопровождается осадкой оттаивающих пород и образованием отрицательных форм рельефа. Термокарст, протекающий без изменения рельефа, называетсятермопланацией (Шур, 1988), или изотропной осадкой (Shiklomanov et al., 2013). Этот процесс, в отличие от термокарста, пока недостаточно исследован в различных природных условиях. Измерения показывают, что величина осадки может варьироваться от нескольких миллиметров до десятков сантиметров в год в зависимости от региональных особенностей (Streletskiy et al., 2025). Вертикальные деформации поверхности, вызванные вытаиванием льдистых отложений, представляют серьёзную угрозу для инфраструктуры и экосистем в районах освоения криолитозоны. По данным М.М. Аржанова с соавторами (2010) к концу XXI века площадь распространения приповерхностных мерзлых грунтов может уменьшиться с 16,6 до 7,9 млн км², а глубина сезонного протаивания увеличится на 0,2–0,6 м с локальными максимумами до 0,9 м.

В рамках данной работы были проанализированы открытые литературные источники, включая научные публикации на русском и английском языках, данные дистанционного зондирования Земли, результаты полевых наблюдений и моделирования с целью выявить ведущие факторы, определяющие пространственно-временную неоднородность проявления вертикальных движений дневной поверхности, вызванных осадкой оттаивающих пород в криолитозоне.

В результате проведённого анализа было выявлено, что ключевые природные факторы можно разделить на две основные группы: климатические, ландшафтные и криолитологические.

К климатическим факторам относятся:

- температура воздуха в летний период; она напрямую влияет на скорость оттаивания мерзлых пород;
- количество жидких осадков, определяющее влагосодержание почвы и её теплопроводность;
- высота снежного покрова, играющая роль изолятора и определяющая тепловой режим грунтов к началу сезона оттаивания.

Среди ландшафтных факторов выделяются:

- рельеф местности, который определяет распределение тепла и влаги;
- тип растительности, влияющий на альбедо поверхности, затенённость и испарение;

Среди криолитологических факторов выделяются литология, льдистость и криогенная текстура сезонноталого слоя и подстилающих ММП, которые определяют устойчивость пород к деформациям.

Изучение этих факторов и механизмов, обуславливающих интенсивность осадки мерзлых пород, имеет критически важное значение для оценки рисков, связанных с дальнейшим оттаиванием верхних горизонтов ММП. Это особенно актуально для Арктики, где изменение климата происходит быстрее, чем в других регионах мира. Результаты данной работы могут быть использованы для создания более точных прогнозов развития экосистем и разработки стратегий адаптации к изменению климата в криолитозоне. Они также помогут в управлении территориями, подверженными вертикальным деформациям поверхности, что особенно важно для минимизации ущерба инфраструктуры и окружающей среды.

Таким образом, выявление факторов, определяющих амплитуды вертикальных движений поверхности в результате осадки является важным шагом к прогнозированию природных опасностей арктических регионов в условиях глобального потепления климата.

1) Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. М.: Наука, Сибирское отд-ние, 1988. - 213 с.

2) Аржанов М. М. и др. Моделирование осадки оттаивания многолетнемерзлых грунтов северного полушария в XXI веке //Криосфера Земли. – 2010. – Т. 14. – №. 3. – С. 37-42.

3) Shiklomanov N. I. Streletskiy, D. A., Little, J. D., & Nelson, F. E. Isotropic thaw subsidence in undisturbed permafrost landscapes // Geophysical Research Letters, 2013, vol. 40, №. 24, pp. 6356-6361.

4) Streletskiy, D. A., Maslakov, A., Grosse, G., Shiklomanov, N., Farquharson, L. M., Zwieback, S., Debolskiy, M. V. Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere-review and perspectives // Environmental Research Letters, 2025, 20, 013006

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ ТЕРМОКАРСТА ПРИЛЕНСКОГО ПЛАТО НА ПРИМЕРЕ ТАБАГИНСКОГО МЫСА

Торговкин Н.В.[1], Платонов И.А.[1,2,3], Пожарская А.Д.[2], Сивцев Д.Е.[1,2], Кизяков А.И.[2], Спектор В.В.[1]

[1] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск

[2]Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

[3] Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

TorgovkinNV@mpi.ysn.ru

Ключевой участок расположен в районе Табагинского мыса, Приленского плато в небольшом смешанном лесном массиве, окруженном с трех сторон заброшенными с/х полями “Кердюген” и “Рожа”, которые были образованы в результате раскорчевки леса в 1976-1978 гг. и эксплуатировались с перерывами до 2004 г. В период 1980-2000 гг. проводились мерзлотно-мелиоративные работы сотрудниками ИМЗ СО РАН под руководством П.П. Гаврильева. Здесь наблюдаются несколько типов термокарстового рельефа, соответствующих последовательным стадиям протаивания ледового комплекса, выделенных Н.А. Граве и П.А. Соловьевым. На участке представлены зачаточные быллары, иё и дюёдя с озером. Эти типы рельефа отличаются морфологией микрорельефа, перепадом высот, обводнением и степенью протаивания льдистой толщи, выраженной в понижении кровли мерзлоты. Наибольший перепад высот в пределах полигонального микрорельефа на участках иё и дюёдя достигает 0.9-1.0 м, сокращаясь до первых десятков см в пределах быллаpов.

На ключевом участке под руководством В.В. Спектора, в 2015 г. была пробурена скважина 15/1 Табагинский мыс. Глубина скважины составляет 27 м, верхняя часть разреза до 11 м сложена отложениями ледового комплекса, на глубине 2.6-4.2 м вскрыт фрагмент полигонально-жильного льда, на глубине 9.1-10.5 м вскрыта ледогрунтовая жила с алевритово-песчанымы заполнителем, ниже 11 м залегают пески с преимущественно массивной криотекстурой. В стволе скважины был установлен 4-канальный логгер Hobo U12-008 с температурными датчиками на глубинах 5 м, 10 м, 15 м и 21 м. Кроме того, площадка оборудована 2-канальными логгерами Hobo U23-003 с температурными датчиками на высоте 2 м, на поверхности земли 0 м, и на подошве деятельного слоя на глубине 1.7 м.

Термометрические наблюдения. Средняя годовая температура (далее СГТ) воздуха, на высоте 2 м в период октябрь 2016 г. - октябрь 2023 г., составила -7.6ºС (2016 г.) … -5.4ºС (2020 г.). СГТ грунта за аналогичный период на земной поверхности варьировалась в пределах: -2.2ºС (2016 г.) ... +0.5ºС (2019 г. и 2020 г.). На глубине 0.5 м СГТ составила: -1.1ºС (2017 г.) … +0.2ºС (2020 г.). На глубине 1,7 м СГТ колебалась в пределах: -1.2ºС (2016 г.) ... +1.1ºС (2020 г.). За период наблюдений с 2016 года температура мерзлых пород повысилась: на глубине 5 м с -1,4ºС до -0,9ºС (после 2020 г.), на глубине 10 м с -1.5 ºС до -1.2 ºС (с 2022 г.), на глубинах 15 м и 21 м на 0.2 и 0.1 ºС и на октябрь 2023 г. составляет -1.4ºС и -1.6 ºС соответственно.

Геокриологический прогноз. Для расчета глубины деятельного слоя, а также для составления геокриологического прогноза состояния мерзлых пород, было применено численное моделирование с использованием программных пакетов *QFrost* и *Frost 3D* по сценариям SSP245 и SSP585 из климатической модели MIROC6 на 2054 и 2100 гг (рис. 1).

По сценарию SSP245 (наиболее консервативный прогноз по повышению температуры воздуха) к 2054 г. мощность деятельного слоя увеличится до 2.2 м, на 2024 г. расчетная глубина сезонного протаивания составляет 1.8 м. Температура мерзлоты глубже 10 м повысится почти в 2 раза, с -1.6°С до -0.8°С. К 2100 г. скорость увеличения глубины сезонного протаивания уменьшится и мощность деятельного слоя составит 2,3 м. На 10 м температура пород будет составлять -0.6°С, глубже 14 м она сохранится на отметке -0.8°С. Повышение температуры пород на глубинах ниже 10 м также замедлится.

По сценарию SSP585 (с прогнозом наиболее значительного повышения температуры воздуха) к 2054 г., глубина СТС составит более 2.4 м, на этой глубине располагается кровля ледяной жилы, на момент конца сезонного промерзания на глубине около 2.3-2.4 м прогнозируется температура около 0°С, которая приведет к началу протаивания. Выше 8 м она вплотную приближается к температуре фазового перехода. На глубине 15 м СГТ приближается к -0.2°С, и глубине 23 м ожидается -0.3°С. К 2100 г. сезонное протаивание достигнет глубины 3.5 м, что вероятно приведет к понижению кровли мерзлоты и дальнейшей активизации термокарста с просадкой поверхности исследуемого участка благодаря частичному, либо полному протаиванию полигонально-жильного льда.

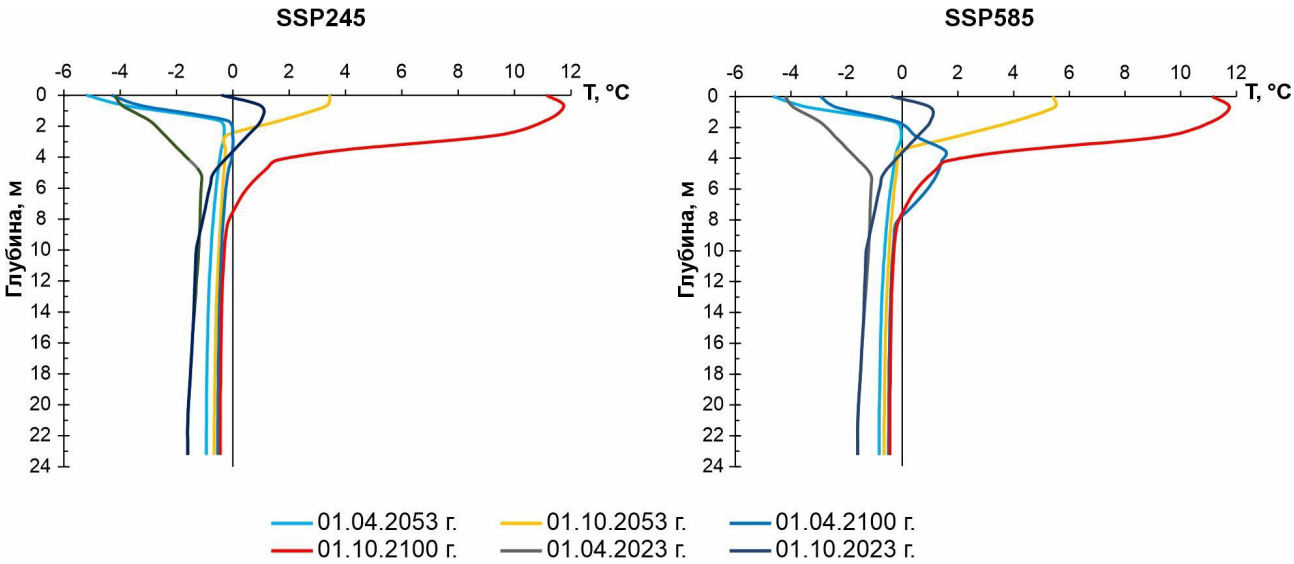


Рис. 1. Результаты моделирования температурного режима пород.

Исследование выполнено в рамках реализации проекта НИОКТР 122011800064-9 “Строение и ключевые этапы эволюции криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене” и государственного задания №121051100164-0 «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии».

ЛЕДОВЫЙ КОМПЛЕКС НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ Р. ИНДИГИРКИ

В.Е. Тумской
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
vtumskoy@gmail.com

В нижнем течении р. Индигирка пересекает Абыйскую низменность, ограниченную горными сооружениями хребта Черского, Полоусным кряжем и Алазейским плоскогорьем, и выходит на Яно-Индигирскую низменность, протекая вдоль западных склонов Кондаковского плоскогорья. На всем этом участке доминирующими типами четвертичных отложений служат сильно льдистые толщи ледового комплекса (ЛК), аласные отложения и голоценовые и современные фации аллювия. Отложения ЛК выделены в воронцовскую свиту и в настоящее время относятся к едомному надгоризонту III_{2-4} (*Решения…, 1987*). Подстилающие ЛК средненеоплейстоценовые (аллаиховская свита) аллювиальные и поздненеоплейстоценовые (аччыгыйская свита) озерные отложения описаны в разрезе на протоке Аччыгый-Аллаиха (*Лаврушин, 1963; Каплина и др., 1980а*), который до настоящего времени является опорным для всего бассейна нижней Индигирки. Строение разреза на прот. Аччыгый-Аллаиха во многом сходно (вплоть до отдельных мелких деталей) с разрезами на берегах пролива Дмитрия Лаптева, что позволяет рассматривать историю геологического развития отложений на территории Яно-Индигирской низменности как единую.

Благодаря обширной деятельности добытчиков бивней и геологическим работам, проведенным за последние 3 года, был охарактеризован разрез едомы вблизи устья р. Тирехтях – обнажение Малыхчын, ранее известное как Тирехтээхское. В нем выделены три основные толщи – нижний ЛК, толща эрозионного перемыва (названная малыхчынским горизонтом) и верхний ЛК, а также перекрывающий их покровный слой. Нижний ЛК имеет мощность 9-10 м и более, состоит из малольдистых алевритов и содержит в нижней и средней частях субвертикальные ледогрунтовые образования, а в верхней - сингенетические ледяные жилы шириной до 2-3 м. Он коррелирует с верхнеаллаиховской подсвитой. На его кровле с размывом залегает малыхчынский горизонт, представленный линзами слоистых опесчаненных алевритов с большим количеством остатков травянистой и кустарниковой растительности, имеющий мощность 2-5 м. В нем присутствует своя генерация ледяных жил и многочисленные линзы термоэрозионно-пещерных льдов мощностью до 0.5 м. Выше до поверхности с абс. отметками около 65-70 м залегают алевриты с мощными сингенетическими ледяными жилами, общей мощностью до 35-40 м, относящиеся к воронцовской свите. Имеющиеся данные позволяют коррелировать малыхчынский горизонт с аччыгыйской свитой (III_1), рассматривая его как делювиально-пролювиальные отложения.

Обнажение Малыхчын приурочено к едоме, расположенной вблизи северной окраины Алазейского плоскогорья. Связанная с ней едомная поверхность имеет отметки не более 100 м, примыкая к возвышенностям высотой 130-680 м, причем расстояние от берега Индигирки до изогипсы 100 м составляет всего 6-7 км. Аналогичное строение и условия залегания имеют отложения в долинах рр. Тирехтях и Семюелях, где коренные породы местами выходят на урезе воды. По обнажению Малыхчын в радиоуглеродной лаборатории ИМЗ СО РАН получено 12 радиоуглеродных датировок из интервала высот от 8 до 37.8 м над урезом воды в реке. Одиннадцать из них получились запредельные, включая с высоты 37.8 м, одна – 48270 л.н. (высота 8 м н.у.р., омоложенная). Также из этого обнажения имеется датировка 40300 ± 1200 (Poz-135500), взятая, по-видимому, из-под покровного слоя (Chlachula et al., 2025). Таким образом, верхний ЛК в обнажении Малыхчын формировался в начале-середине позднего неоплейстоцена, до примерно 40 тыс. л.н., т.е. до середины III_3. Более поздние отложения (III_{3-2}) в этом районе не обнаружены.

Расположенный в 120 км ниже по течению разрез бывшего Воронцовского яра приурочен к юго-западному краю Кондаковского плоскогорья. ЛК мощностью около 40 м залегает в непосредственной близости от выходов коренных пород, изогипса 100 м расположена в 1.5-2 км от него. Для него известны две датировки – более 41 тыс. л.н. с высоты около 15 м н.у.р. и 37000±1100 л.н. с высоты около 21 м (Втюрин и др., 1984). Если доверять последней, то верхняя часть разреза Воронцовского яра может иметь возраст до III_2 включительно. Еще в 45 км ниже по течению расположен Шамановский яр, отложения которого также представлены ЛК и расположены на западных склонах того же Кондаковского плоскогорья. Мощность ЛК составляет здесь 24-26 м, расстояние до изогипсы 100 м около 4 км. Имеющиеся радиоуглеродные датировки с высоты около 8 м - 32900 л.н. по остаткам травы и 29300 л.н. по органике из ледяной жилы (Каплина и др., 1980б) предполагают, что возраст ЛК здесь также III_{3-2}. Датировок из обнажения на Аччыгый-Аллаихе пока нет.

Краткий обзор основных разрезов ЛК по Индигирке показывает, что они приурочены к склонам локальных возвышенностей, но условия залегания отложений часто остаются под вопросом –

прислонены они к коренным породам в виде террас или представляют собой шлейф в нижних частях склонов. Если судить по морфологии и частоте аласных котловин, которые служат своеобразной «лакмусовой бумажкой» наличия и мощности сильнольдистых отложений ЛК, то в краевых частях Алазейского и Кондаковского плоскогорий ЛК залегает местами в виде шлейфов, а местами – в виде прислоненных террас (например, район к северу от Шамановского обнажения). При этом в разрезах выделяются как два горизонта ЛК (Малыхчын, Аччыгый-Аллаиха), так и один (Воронцово, Шаманово), причем возраст верхнего меняется – вблизи склонов возвышенностей он достигает, по-видимому, конца позднего неоплейстоцена (сартанского времени), а на удалении от них возраст отложений вблизи поверхности едом, в лучшем случае, молотковский (III_3). Несмотря на относительно пологий рельеф вышеупомянутых плоскогорий, на их поверхности отложений ЛК нет. Эти данные и соображения свидетельствуют против эолового происхождения отложений ЛК, т.к. оно не позволяет объяснить отсутствие ЛК на территории центральных частей плоскогорий, разный возраст и условия их залегания в близрасположенных точках одного района. С этой точки зрения более вероятным представляется склоновый (пролювиально-делювиально-солифлюкционный) и аллювиально-делювиальный генезис этих отложений.

Работы проводились при финансовой поддержке гранта РНФ 23-77-10046 (полевые работы 2024 г.) и базового проекта 122011800064-9.

Втюрин Б.И., Болиховская Н.С., Болиховский В.Ф., Гасанов Ш.Ш. Воронцовский разрез едомных отложений в низовьях р. Индигирка. // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 1984, № 53, с. 12-21.

Каплина Т.Н., Шер А.В., Гитерман Р.Е., Зажигин В.С. и др. Опорный разрез плейстоценовых отложений на р. Аллаихе (низовья Индигирки) // Бюл. Комис. по изуч. четвертич. периода. – 1980а. - №50. - С. 73-95.

Каплина Т.Н., Шилова Г.Н., Пирумова Л.Г. Шамановский опорный разрез позднеплейстоценовых и голоценовых отложений Индигирки // Известия АН СССР, сер. геол., 1980б, №9, с. 74-81.

Лаврушин Ю.А. Аллювий равнинных рек субартического пояса и перигляциальных областей материковых оледенений // Тр. ГИН АН СССР, вып. 87. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 253 с.

Решения Межведомственного стратиграфического совещания по четвертичной системе Востока СССР (Магадан, 1982 г.). Объяснительные записки к региональным стратиграфическим схемам четвертичных отложений Востока СССР. - Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1987. - 241 с.

Chlachula J., Dyakonov V.M., Alekseev F.N., Protopopov A.V., Klimovskiy A.I., Kolesov S.D**.** The Central Indigirka in the Last Ice Age, North-East Arctic Siberia. Quaternary Science Reviews, Volume 349, 2025, 108990. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2024.108990.

ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ОКРЕСТНОСТЯХ ЯМАЛЬСКОЙ ВОРОНКИ

Шалимов Д.А.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Географический факультет, Москва
shalimovda@my.msu.ru

Ямальская воронка (Ямальский кратер) — уникальный геокриологический объект, возникший в результате взрывного события в 2013 году. Первые годы после её образования проходил этап активных полевых исследований объекта, однако в дальнейшем интерес научного сообщества постепенно ослабевал. С прекращением регулярных полевых обследований перестали поступать данные о развитии отрицательной формы рельефа и изменении геокриологических условий в окрестностях воронки, что не позволяло продолжать изучение процессов и их проявлений. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют свидетельствуют о продолжении процессов термоденудации вблизи воронки [1].

Целью работы является картографирования изменений геокриологических условий в окрестностях Ямальской воронки, а также определение проявлений процессов, происходящих на изучаемой территории. В качестве исходных данных были использованы полосы («стрипы») цифровой модели поверхности (ЦМП) Arctic DEM и снимки космических аппаратов (КА) семейства Канопус-В. ЦМП представлены 24 полосами с пространственным разрешением 2 м. Набор использованных снимков КА Канопус-В включает в себя 8 снимков, полученных в видимом диапазоне. Снимки и полосы ЦМП были отобраны на летний период, что позволяет минимизировать влияние сезонного фактора изменения местности. ЦМП использовались для вычисления разности значений высот в каждой точке местности. Анализ снимков проводился при помощи визуального дешифрирования для панхроматических и методом кластеризации для снимков синтеза натуральной цветопередачи.

Первичный анализ собранных материалов показал, что окрестности Ямальской воронки с севера ограничены локальными возвышенностями, в то время как к югу наблюдается понижение с регулярным небольшим водотоком. Для работы в таком крупном масштабе важно соблюсти баланс между пространственным разрешением и полным охватом процессов. Поэтому решено было ограничить зону исследования расчётом границ водосборного бассейна для первых пикселей наблюдаемого водотока.

При помощи вычисления разностей фрагментов ЦМП были получены значения высот и глубин форм рельефа, позволяющие оценить вертикальные изменения на местности. Из расчётов видно, что процесс развития термоцирка протекал неравномерно. Опускание дна образующейся отрицательной формы между разностями колебались от 0,5 до 3,5 м. Помимо последовательного протекания процесса просадки грунтов, в разное время происходило и их накопление (до 2,5 м), вероятно, связанное с переносом грунтового материала (например, с 2020-2023 гг.). Дешифрирование снимков также указывает на неравномерность протекания развития отрицательной формы рельефа. Средняя величина отступания стенки термоцирка составила от 4 м (2018-2019 гг.) до 10 м (2023-2024) в год. Визуальный анализ позволяет проследить ускорение последовательного отступания стенок термоцирка в целом, в то время как на некоторых участках граница почти не смещается (изменения составляют в среднем менее двух метров в год). Такая динамика может быть обусловлена неравномерным оттаиванием пластовых льдов под грунтами, приводящих к развитию криогенных оползней как к одному из результатов процесса термоденудации. Выделение границ развивающейся отрицательной формы рельефа также проходило при помощи ЦМП, поскольку визуальные методы обработки панхроматических снимков (более высокого разрешения) в силу особенностей сезонного освещения в приполярных территориях не позволяли дешифрировать границу термоцирка, в то время как ЦМП дают возможность через дополнительные инструменты (такие как расчёт углов наклона поверхности) получать довольно чёткую границу зоны протекания криогенных процессов.

Тарасевич И. И. и др. Распространение и динамика термоцирков на ключевом участке Центрального Ямала по материалам дистанционного зондирования // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2024. – Т. 70. – №. 3. – С. 391-411

КЫЛЛАХСКОЕ ОБНАЖЕНИЕ НА Р. ЛЕНЕ: НОВЫЕ ДАННЫЕ О ДРЕВНЕМ КРИОГЕНЕЗЕ

Щипанова Е.А.[1], Лыткин В.М.[1], Павлова М.Р.[1], Шапошников Г.И.[1], Шитов М.В.[2]
[1] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
[2] Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (Институт Карпинского), Санкт-Петербург
eseniia.shchipanova@gmail.com

Кыллахское обнажение (по названию острова на р. Лене), давно известное, но всё ещё недостаточно исследованное, расположено на правом берегу р. Лены в 25 км от г. Олёкминска Олёкминского района Республики Саха (Якутия). Впервые следы древних криогенных процессов в этом разрезе были описаны И.Л. Шофманом в 1974 г., среди которых были отмечены псевдоморфозы по ледяным клиньям и криотурбации. Однако до сих пор «криостратиграфия» разреза (количество ярусов криогенных деформаций, их взаимоотношения и последовательность образования) неизвестна, а палеоклиматическая интерпретация следов древней мерзлоты не проводилась.

В ходе полевых работ 2023 г. сотрудников ИМЗ СО РАН под руководством В.М. Лыткина, было проведено почти непрерывное описание Кыллахского обнажения, расположенного на высоте 72 метров над урезом воды р. Лены. В результате проведённых исследований было вскрыто около 63 метров четвертичных отложений (водноосадочных и субаэральных), залегающих под эоловыми песками дюн высотой 9–10 м. В водноосадочных отложениях распространены разнообразные следы криогенных процессов – тонкие «нитевидные» эпигенетические трещины, эпигенетические песчаные жилы и микросбросовые деформации.

Тонкие «нитевидные» эпигенетические трещины вертикальной протяжённостью до 1 метра и шириной до первых сантиметров встречаются в интервале 14–20 м над урезом воды. Тело трещин заполнено белёсым пылеватым мелкозернистым песком, трещины разбивают и секут текстуры вмещающих отложений с образованием микросбросов амплитудой до первых см.

Эпигенетические песчаные жилы были отмечены в водно-осадочных отложениях в интервалах 20–25 м и 30–35 м над урезом воды. Их вертикальная протяжённость за счёт «бахромы» в основании – расслаивания на жилки – более 1 м; устья жил вскрыть не удалось. Они заполнены белёсым пылеватым мелкозернистым песком. Жилы не деформируют слои вмещающих пород.

Гораздо шире следы криогенных процессов фиксируются в Кыллахском разрезе на микроскопическом уровне. Морфоскопическое изучение поверхности песчаных зёрен проводилось в лаборатории МАН РС (Я) с помощью сканирующего электронного микроскопа СЭМ Hitachi TM4000Plus при 40–400-кратном увеличении на выборке из 30–50 зёрен, для анализа использовались фракции 0,315–0,125 мм, в них отчётливо проявляются следы криогенного разрушения кварца и полевого шпата.

В результате морфоскопического анализа поверхности кварцевых зёрен (рис. 1), следы криогенеза встречаются как в водноосадочных, так и в субаэральных отложениях. Признаком криогенного происхождения является наличие раковистых сколов, углы которых имеют острую форму, не претерпевшую механического изменения в подвижной среде.

Судя по вышеперечисленным признакам, наибольшему криогенному изменению подверглись водноосадочные отложения в интервале от 14 до 35 м над урезом воды р. Лены, но в покрывающих их субаэральных отложениях следы криогенеза зафиксированы только на микроскопическом уровне.

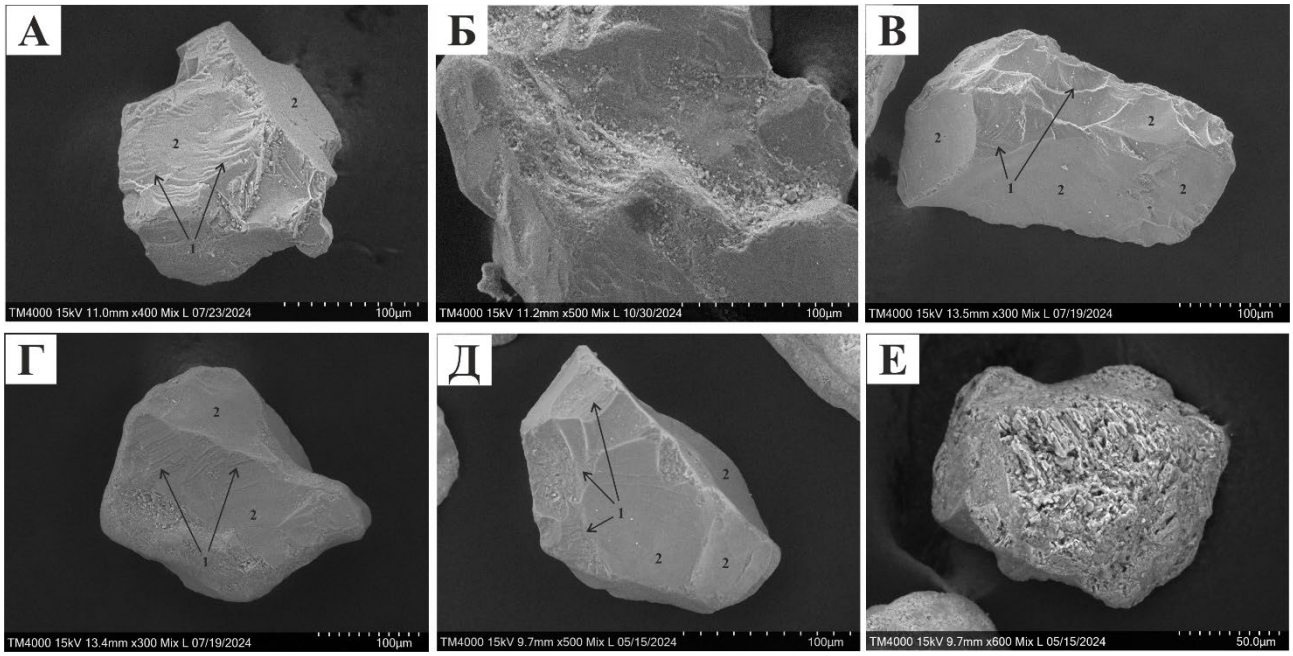


Рис. 1. Криогенный микрорельеф песчаных зёрен кварца: 1 – раковистые сколы, 2 – гладкие полированные поверхности (А – песчаное зерно из водноосадочных отложений; Б – увеличенный фрагмент раковистых сколов (водноосадочные отложения); В, Г, Д, Е – песчаные зёрна из субаэральных отложений).

Таким образом, хотя следы древнего криогенеза отчётливо фиксируются как на макро-, так и на микроуровне, никаких свидетельств существования древней многолетней мерзлоты выявить не удалось. Вероятно, эта мерзлота носила сезонный характер.

Исследование выполнено при поддержке научно-исследовательского проекта № 122011800064-9 «Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене»

2. КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СНЕЖНОЙ МЕЛИОРАЦИИ ПРИ БОРЬБЕ С ТЕРМОЭРОЗИЕЙ ЗЕМЕЛЬ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф.
Институт мерзлотоведения им.П.И.Мельникова СО РАН, Якутск
afgalkin@mail.ru

Одним из перспективных направлений борьбы с негативными проявлениями термокарста является дополнительное увлажнение и проморозка деятельного слоя грунта. Совокупность этих процессов позволяет снизить глубину оттаивания и сохранить ледовый комплекс (ледяные линзы и прослойки) в мерзлой зоне. Оценена эффективность снежной мелиорации грунтов, которая дает возможность максимально снизить термическое сопротивление снежного покрова (проморозить грунт) и сохранить запасы влаги в снежном покрове (увлажнить грунт деятельного слоя). Установлена новая закономерность, которую можно сформулировать следующим образом: «Степень увеличения начального теплового потока при проведении снежной мелиорации трамбованием прямо пропорциональна квадрату коэффициента уплотнения снежного покрова и не зависит от теплофизических свойств грунта и снега». Достоверность данного количественного соотношения доказана путем сравнения с имеющимися данными теоретических исследований и натурных наблюдений отечественных и зарубежных ученых, приведенными в открытых источниках. В частности, оценена достоверность обобщенных формул для определения коэффициента теплопроводности снега и термического сопротивления снежного покрова в зависимости от плотности снега. При этом снег рассматривался как трехкомпонентная среда: лед-воздух-вода. Снежный покров в общем виде рассмотрен как многослойная среда. Проведены теоретические исследования по обоснованию новых способов борьбы с термоэрозией земель в зоне многолетней мерзлоты, путем дополнительного увлажнения грунтов деятельного слоя за счет снежной мелиорации. Получены аналитические зависимости для определения степени изменения глубины и скорости оттаивания грунтов деятельного слоя в первый и второй год после проведения снежной мелиорации. Показано, что в первый год после снежной мелиорации скорость и глубина оттаивания грунта возрастают во всем возможном диапазоне изменения влажности. При этом степень роста может быть значительной и достигать почти двукратной величины. Установлено, что существует следующая количественная закономерность, определяющая изменение глубины и скорости оттаивания грунтов деятельного слоя при дополнительном увлажнении: «Величина изменения глубины и скорости оттаивания грунта деятельного слоя в первый год после снежной мелиорации прямо пропорциональна отношению коэффициентов теплопроводности воды к воздуху в степени, равной половине доли дополнительного увлажнения и не зависит от длительности периода оттаивания и теплофизических свойств грунта». Показано, что на второй год после снежной мелиорации глубина и скорость оттаивания грунта могут, как снижаться, так и возрастать. Установлено, что существует критическая степень увлажнения, которая приводит не к снижению, а к увеличению скорости и глубины оттаивания, как в первый, так и во второй год после проведения мелиоративных мероприятий. Получены значения для определения оптимальной и критической степени увлажнения грунтов деятельного слоя, соблюдение которых на практике, путем внесения необходимых корректив в технологию проведения снежной мелиорации, позволит обеспечить максимальную эффективность новых способов восстановления нарушенных термокарстом земель в зоне многолетней мерзлоты. Для наглядности, на рисунках 1 и 2 приведены в графической форме основные количественные результаты исследований, полученные на основе вариантных расчетов для характерных геокриологических условий криолитозоны.

Результаты теоретических исследований легли в основу новой технологии восстановления нарушенных термокарстом сельскохозяйственных земель, которая включает способы борьбы с криогенезом, защищенные патентами РФ: 1). Способ мелиорации нарушенных термокарстом земель / Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Железняк М.Н., Сивцев М.А., Плотников Н.А.//Патент РФ № 2813326. Опубл.12.02.2024. Бюл. № 5. 2). Способ мелиорации земель в зоне многолетней мерзлоты / Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Железняк М.Н., Сивцев М.А., Плотников Н.А.//Патент РФ № 2813788. Опубл.16.02.2024. Бюл. № 5. 3). Способ мелиорации земель в криолитозоне / Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Железняк М.Н., Сивцев М.А., Плотников Н.А.//Патент РФ № 2813665. Опубл.14.02.2024. Бюл. № 5. 4). Способ зимней мелиорации земель / Галкин А. Ф., Жирков А. Ф., Железняк М. Н., Плотников Н.А. //Патент РФ № 2823027. Опубл. 17.07.2024г. Бюл. № 20.

А) Б)

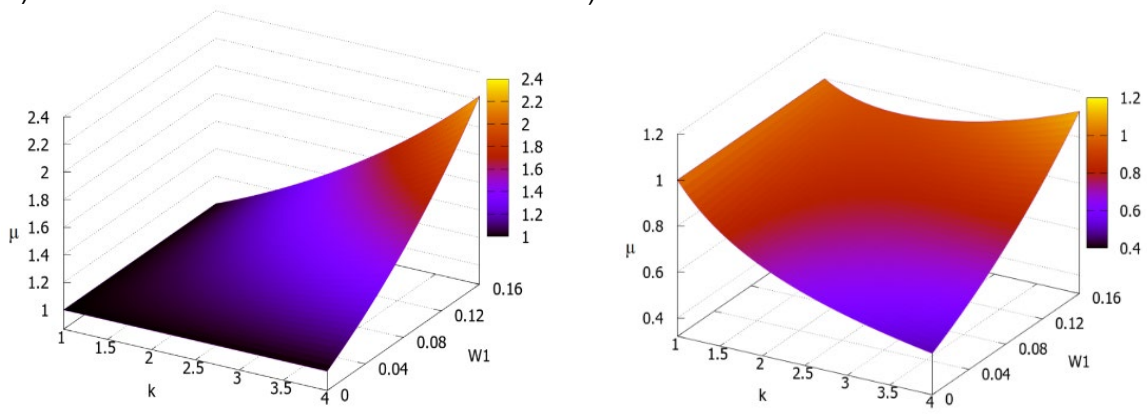


Рис.1. Коэффициент изменения глубины оттаивания грунта «μ»: А) первый и Б) второй год после проведения снежной мелиорации при средней начальной влажности «W1» и различной степени увлажнения грунта деятельного слоя («k = w_2/w_1»)

А) Б)

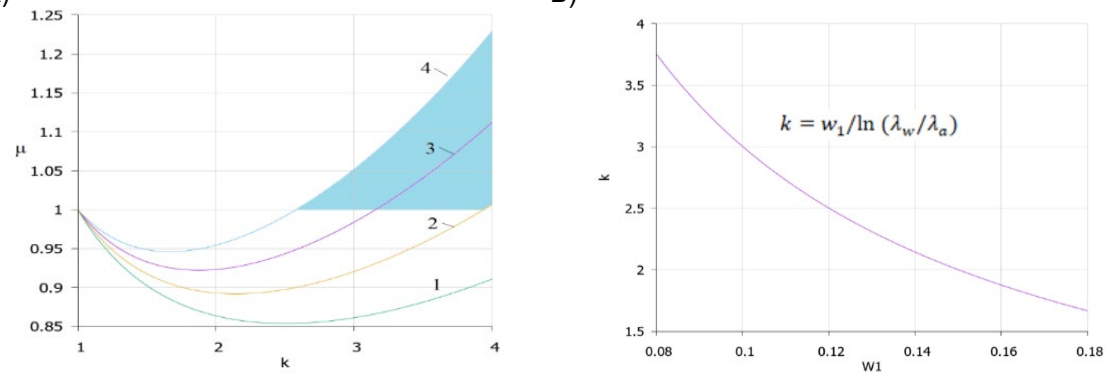


Рис.2. А) - степень изменения глубины оттаивания «μ» на второй год после снежной мелиорации в зависимости от начальной влажности грунта «W1» (до проведения снежной мелиорации): 1 - W_1 = 0,1; 1 - W_1 = 0,12; 3 - W_1 = 0,14. 4 - W_1 = 0,16; Б) - оптимальное значение степени увлажнения грунта деятельного слоя «k» для достижения максимального уровня снижения глубины оттаивания «μ» на второй год.

ТЕРМОДЕНУДАЦИЯ БЕРЕГОВ МОРЕЙ ЛАПТЕВЫХ И ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО

Григорьев М.Н.
Институт мерзлотоведения СО РАН, г.Якутск
grigoriev@mpi.ysn.ru

Почти половину протяженности льдистых разрушающихся морских арктических берегов Восточной Сибири следует относить к термоабразионно-термоденудационному типу, где термоабразия и термоденудация - наиболее динамичные и тесно связанные друг с другом процессы криоморфогенеза. Морские берега этого типа обычно отличаются наличием на них отчетливо выраженных термотеррас. Слабонаклонные площадки таких террас, выработанные термоденудацией, отделяют термоуступы и термоцирки от термоабразионного клифа, который испытывает непосредственное воздействие морских волн. Постоянное отступание термоабразионного клифа не позволяет стабилизироваться склоновой системе, состоящей из одной или нескольких термотеррас и одного или нескольких термоденудационных уступов.

Анализ морфометрии рассматриваемых типов берегов показывает, что сколько-либо выраженные термотеррасы практически отсутствуют на тех участках побережья, где абсолютные высоты поверхности вблизи уступов ледового комплекса не превышают 25 м. В то же время, они являются непременным элементом берегового рельефа там, где эти высоты больше отмеченного значения. По нашим представлениям, это связано с ограниченной способностью к долговременному транзиту материала вдольбереговыми потоками наносов. При поступлении большого объема берегового материала в зону прибоя, скорости термоабразии уменьшаются. Верхняя часть берегового склона продолжает разрушаться термоденудационными процессами примерно с той же скоростью.

Приблизительные расчеты показывают, что для возникновения диспропорции в темпах отступания нижнего (термоабразионного) и верхнего (термоденудационного) уступа в пределах термоцирка протяженностью около 250 м, необходимо наличие потока береговых наносов массой от 6 до 10 тыс. тонн в год.

Скорость термоденудации местами опережает скорость термоабразии. В этом случае в прибрежной зоне формируется слабонаклонная термотерраса, по поверхности которой в направлении к морю осуществляется транзит талого влагонасыщенного материала, переработанного термоденудационными процессами. Однако, темпы термоденудации не могут опережать скорость термоабразии в течение длительного времени, поскольку тенденция к выполаживанию берегового склона приводит к накоплению на нем слоя склоновых отложений и затуханию термоденудационных процессов.

Исследование выполнено при поддержке научного проекта НИОКТР 122011400151-0 «Деградация мерзлоты и трансформация рельефа в береговой зоне и на шельфе арктических морей восточного сектора РФ: Динамика, прогноз и риски».

СТРОЕНИЕ МЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ В РАЙОНЕ КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА "СЕМЬ ЛИСТВЕННИЦ" (ЯНАО) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Бобров Н.Ю.[1], Шлыков А.А.[1], Сараев А.К.[1], Богатова Д.М.[2], Синицкий А.И.[3], Цыбаков И.С.[1]
[1] Санкт-Петербургский государственный университет
[2] Московский государственный университет
[3] ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики»
n.bobrov@spbu.ru

Для изучения криолитозоны применяется широкий спектр геофизических методов, среди которых важное место занимают электрические и электромагнитные методы, Электрические свойства мерзлых отложений являются индикатором их состояния. При промерзании удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород возрастает, что связано со скачкообразным уменьшением доли свободной воды. При оттаивании происходит обратный процесс.

Карбоновый полигон «Семь лиственниц», созданный распоряжением Правительства ЯНАО в 2023 году, является удобной площадкой для тестирования геофизических технологий, используемых для изучения криолитозоны. На полигоне имеются скважины, доступна геологическая информация и результаты предшествующих геофизических исследований,

Летом 2024 года на территории полигона были проведены работы методом радиомагнитотеллурического зондирования с контролируемым источником (РМТ-К) и методом переходных процессов (МПП). Измерения проводились вдоль двух профилей 0 и 1 длиной около 700 м (рис. 1, б). Зондирования методом РМТ-К с использованием в качестве источника горизонтального электрического диполя (линии, заземлённой на концах) были выполнены на обоих профилях с шагом 20 м. На профиле 0 также выполнены зондирования МПП с шагом 40 м с использованием однопетлевой установки (квадратная петля 50*50 м). Результаты представлены на рис. 1, а, в, г.

По результатам электромагнитных зондирований структура геоэлектрического разреза в районе работ в целом может быть охарактеризована как горизонтально слоистая. На профиле 0 на глубинах, в основном, от 200 до 240 м по данным МПП выделяется низкоомное основание (УЭС меньше 5 Омм). УЭС пород выше по разрезу составляет сотни Омм. Кровля этого высокоомного слоя выделяется по данным РМТ-К на глубинах 50-60 м. Его перекрывает низкоомный слой в интервале глубин от 20 до 50 м. В верхней части (до 30 м) разрез крайне неоднородный по электрическим свойствам и представляет собой чередование по латерали относительно высокоомных и низкоомных зон. Сравнение с результатами бурения показывает, что высокоомные части геоэлектрических разрезов соответствуют более песчаным и более льдистым отложениям, тогда как меньшие значения УЭС коррелируют с суглинками. При температурах -1…-2 °С, регистрируемых в термометрических скважинах, на электрические свойства пород в большей степени влияет литология, чем температура. Поэтому в верхней части геоэлектрических разрезов УЭС больше коррелирует с литологическим составом отложений, чем с температурой пород.

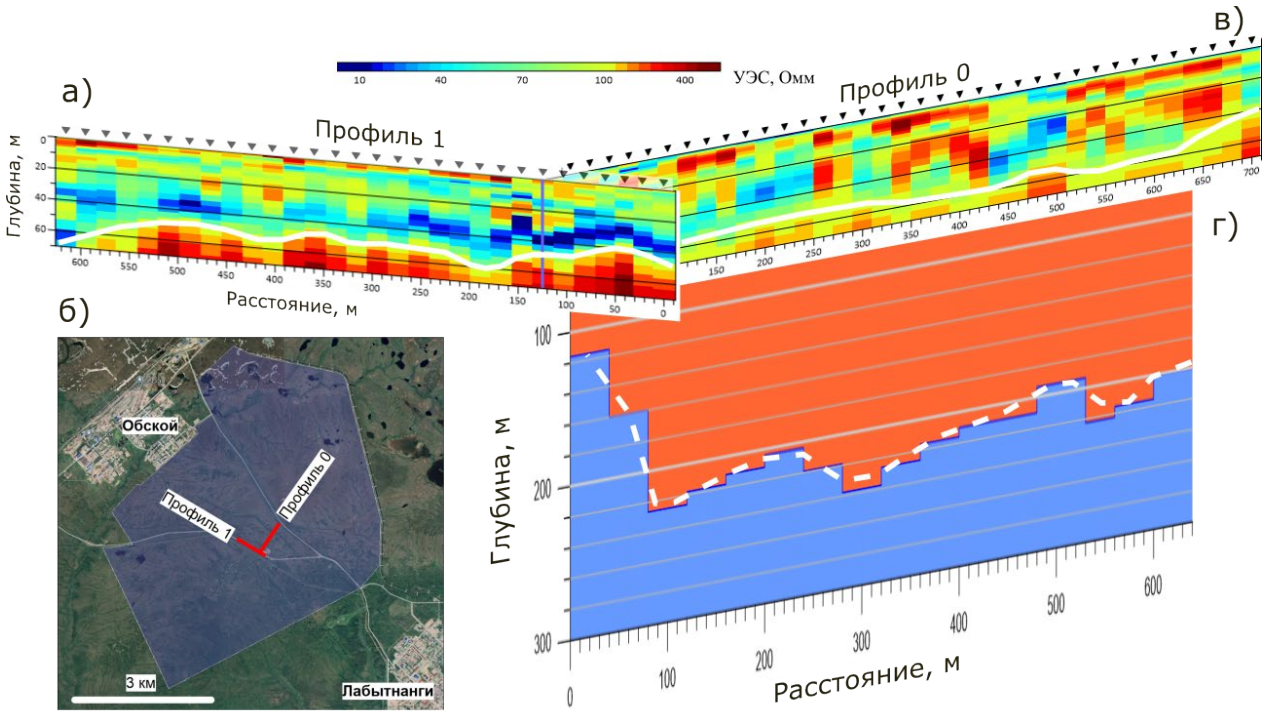


Рис. 1. а) геоэлектрический разрез по профилю 1 по результатам зондирований методом РМТ-К; б схема полигона «Семь лиственниц» с обозначенными профилями геофизических работ; в) геоэлектрический разрез по профилю 0 по результатам зондирований методом РМТ-К; г) изменение глубины проводящего основания (синий цвет) вдоль профиля 0 по результатам зондирований МПП. Сплошной белой линией обозначена предполагаемая кровля (а, в), пунктирной белой линией – подошва реликтовой мёрзлой толщи (г).

Данные геофизических исследований согласуются с имеющейся геологической и криологической информацией. Для района Салехарда характерно двухслойное строение мерзлой толщи, связанное с оттаиванием её верхней части в период климатического оптимума голоцена и повторным промерзанием с поверхности в позднем голоцене. Кровля реликтовой плейстоценовой мерзлоты в окрестностях Салехарда вскрыта скважинами на глубинах 70-100 м. В районе карбонового полигона она, возможно, находится ближе к поверхности. Действие мерзлотного фактора сочетается здесь с особенностями литологического строения.

По геологическим данным между пос. Обской и г. Лабытнанги на глубине 40-50 м находится кровля аллювиально-морских и морских отложений, сложенных кварцевыми песками, алевритами, супесями, глинами. Выше по разрезу залегают преимущественно глинистые ледниковые отложения. Поскольку мёрзлые пески, при прочих равных условиях, имеют более высокое УЭС, чем супеси и суглинки, можно предположить, что на глубине 50-60 м на геоэлектрических разрезах мы видим кровлю реликтовой мёрзлой толщи песчаных отложений плейстоценового возраста. Данные МПП, с другой стороны, фиксируют наличие низкоомного основания геоэлектрического разреза на глубинах 200-240 м. Эту границу можно соотнести с подошвой реликтовой мёрзлой толщи, которая вскрыта скважинами в районе Салехарда на близких глубинах. Однако данная граница может быть связана и с изменением литологического состава отложений платформенного чехла.

Работы выполнены при поддержке гранта Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа (договор № 601-19-01/10 от 01 июля 2024 г.).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ТЕРМОЦИРКОВ НА ЦЕНТРАЛЬНОМ ЯМАЛЕ В 2024 г.

Бурдак Д.В.[1], Хомутов А.В.[2], Гинзбург А.П.[3], Данько М.М.[2], Левочкина О.В.[2], Мареев В.А.[1,2], Тарасевич И.И.[2,4], Хайруллин Р.Р.[5]

[1] *Тюменский индустриальный университет, Тюмень*

[2] *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень*

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

[4] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

[5] *b.geos GmbH, Корнойбург, Австрия*

dasha.burdak@mail.ru

Мониторинг термоцирков на Центральном Ямале является актуальной проблемой в контексте изучения криогенных процессов в условиях резко изменяющихся климатических параметров. Современные исследования демонстрируют, что наблюдение за динамикой термоденудации позволяет выявлять закономерности в изменениях геокриологических характеристик региона.

За последние годы накоплены данные, подтверждающие колебания температурного режима, влияющие на формирование термоцирков. На Центральном Ямале начиная с 2012 г. наблюдается увеличение активности термоденудации (Бабкина и др., 2019), что вызывает изменения в ландшафтах этой территории. (Хомутов и др., 2024).

Мониторинг термоцирков на Центральном Ямале в районе научного стационара «Васькины Дачи» проводится с 2012 г. (Хомутов и др., 2020). К 2019 г. темпы прироста большинства активизировавшихся в 2012-2013 гг. термоцирков снизились. Продолженный в 2020-2021 гг. полевой мониторинг с использованием модуля Digital Shoreline Analysis System в ГИС-пакете ESRI ArcGIS (Тарасевич и др., 2022) для оценки скоростей отступания бровок термоцирков на основе БПЛА-ортофотопланов показал существенную скорость отступания анализируемых термоцирков, находившихся в период с 2017 по 2021 г. в стадии активного роста.

В конце августа 2024 г. в результате полевого мониторинга было обследовано 6 термоцирков, включая как наблюдаемые с 2012-2013 гг, так и более свежие (ТЦ-2m, возникший в 2020 г., и ТЦ-Э, обнаруженный в 2023 г.). Для фиксации положения бровок проводилась БПЛА-съемка с последующим построением ортофотопланов в программе Agisoft Metashape Pro. Оценка ежегодного прироста площадей термоцирков после 2019 г. проведена путем совмещения ортофотопланов в ГИС-пакете ESRI ArcGIS. Все ортофотопланы за предыдущие годы (2021-2023 гг.) построены на основе БПЛА -съемок, проводимых также во второй половине августа. Данные приведены в таблице 1.

Кроме того, по имеющимся дистанционным материалам (ESRI World Imagery) и ортофотопланам за 2020-2023 гг. проведена оценка динамики некоторых других термоцирков, не обследованных в полевых условиях в 2024 г.

Для большинства термоцирков, возникших в 2012-2013 гг., характерно сокращение прироста площади к 2024 г. Только для ТЦ-5н сохраняются высокие темпы отступания бровки. По полевым данным только этот термоцирк имел активную стенку с обнажающимся пластовым льдом. К 2024 г. произошло значительное увеличение общей площади этого термоцирка (до 30 тыс. м^2), что сопоставимо лишь с одним активным на современном этапе термоцирком района исследований – ТЦ-1 общей площадью более 56 тыс. м^2 (по наиболее актуальным данным мозаики ESRI World Imagery на дату 13.08.2023 г.). Протяженность активно вытаивающей ледяной стенки ТЦ-5н в 2024 г. достигает 600 м, что сопоставимо с протяженностью ледяной стенки ТЦ-1 в годы его наибольшей современной активности (2015-2017 гг.).

Таблица 1. Данные полевых наблюдений за динамикой термоцирков в 2019-2024 гг.

Год	Площадь термоцирков (прирост), м2					
	ТЦ-2	ТЦ-2m	ТЦ-4а	ТЦ-5	ТЦ-5н	ТЦ-Э
2019	7519	-	5068	8296	8864	-
2020	7669(+150)	166	5541(+473)	9295(+999)	12191(+3327)	
2021	нд	1569(+1403)	5934(+393)	10505(+1210)	16877(+4686)	
2022	7889(+220)	1692(+142)	нд	нд	нд	
2023	нд	нд	6462(+528)	11456(+951)	25388(+8511)	345
2024	7914(+56)	1819(+127)	6512(+59)	11616(+160)	30596(+5208)	425(+80)

Как показывает анализ дистанционных материалов, в последние годы продолжают формироваться новые криогенные оползни течения, приводящие как минимум к формированию относительно небольших («эмбриональных») термоцирков. Один из таких, но при этом достаточно

крупный термоцирк, образовался на левобережье одного из левых притоков р. Нгэрм-Лымбадъяха. По данным мозаики ESRI World Imagery на дату 13.08.2023 г. его площадь составляла более 9 тыс. м^2, что превышает площадь многих наблюдаемых с 2012-2013 гг. термоцирков.

Таким образом, на Центральном Ямале в 2024 г. сохраняется активность криогенных процессов, приводящих к формированию термоцирков.

Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факащук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 99-109.

Тарасевич И.И., Кизяков А.И., Лейбман М.О., Письменюк А.А., Нестерова Н.Б., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Динамика термоденудации на Центральном Ямале за 2017-2021 гг. по данным ежегодного мониторинга // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 9, 2022, С. 253–257.

Хомутов А. В., Бабкина Е. А., Хайруллин Р. Р., Дворников Ю. А. Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010-2018 гг // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2024. – Т. 70, № 2. – С. 222-237.

Хомутов А.В., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Бабкина Е.А., Белова Н.Г., Кизяков А.И., Хайруллин Р.Р., Нестерова Н.Б., Тихонравова Я.В. Термоцирки Карского региона: полевые и дистанционные методы исследований // Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск (Россия), 28-30 сентября 2020 г.//Я.: Издательство и типография ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН. – 2020, с.196-200.

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АБРАЗИОННО-ТЕРМОДЕНУДАЦИОННЫХ БЕРЕГОВ КРИОЛИТОЗОНЫ

Викторов А.С.
Институт геоэкологии РАН, Москва
vic_as@mail.ru

Целью исследования явилось изучение закономерностей динамики абразионно-термоденудационных берегов криолитозоны на основе комплекса математического моделирования и космической съемки.

Ландшафт абразионно-термоденудационных берегов представляет собой сочетание циркообразных форм, включающих в себя оползневые тела разного возраста, поверхности с развитием интенсивных термоабразионных, эрозионных, обвально-осыпных и термоденудационных процессов. Характерной особенностью циркообразных форм является четкая дугообразная граница с прилегающей водораздельной поверхностью, хорошо дешифрируемая на материалах космических съемок, возникновение такой границы связано с тем, что формирование циркообразной формы начинается, как правило, с развития оползневого процесса.

Развитие берегов происходит под действием противоречивых тенденций с развитием комплекса процессов, включающего увеличение числа циркообразных форм за счет образования новой циркообразной формы внутри границ существующей с разбиением более старой формы на две части, уменьшение числа циркообразных форм за счет полного стирания циркообразной формы при наложении более молодых, частичное стирание уже существующих форм с сохранением их числа за счет наложения более молодых («боковое стирание»), появление на том или ином участке новой циркообразной формы.

Для анализа изменений берегов был использован комплекс допущений предложенной ранее (А.С.Викторов, 2022) модели формирования морфологической структуры прямолинейного длинного абразионно-термоденудационного берега с однородными физико-географическими и геокриологическими условиями, предполагается также относительное постоянство во времени климатических условий:

- вероятность появления новых циркообразных форм за некоторый интервал времени на отрезке береговой линии определяется только величинами временного интервала и отрезка,
- размеры (длина хорды дуги) возникающих циркообразных форм не зависят от места их появления на участке и имеют постоянное вероятностное распределение, не зависящее от времени.

Вместе с тем, в настоящем исследовании в отличии от ранее опубликованной модели учтены все варианты изменения морфологической структуры без упрощений.

Проведенный математический анализ модели позволил показать, что на однородных участках в разных физико-географических и геокриологических условиях при значительном времени развития формируется устойчивое стационарное распределение размеров циркообразных форм абразионно-термоденудационных берегов криолитозоны. Различия условий разных участков не влияют на факт существования предельного стационарного распределения.

Получена новая зависимость устойчивого стационарного распределения размеров циркообразных форм абразионно-термоденудационных берегов от распределения размеров формирующихся молодых циркообразных форм. Физико-географические, геолого-геоморфологических и геокриологические условия участков влияют на характер стационарного предельного распределения через распределение размеров образующихся молодых циркообразных форм

$$F(x) = 1 - \frac{a}{2}\frac{[1-F_0(x)]}{[x+a]} - \frac{a}{2}\frac{a - \int_0^x [1-F_0(v)]dv}{[x+a]^2},$$

где $a, F_0(x)$ - соответственно математическое ожидание (средний размер) и распределение размера образующихся циркообразных форм.

Анализ изменения средней плотности расположения и средних размеров циркообразных форм абразионно-термоденудационных берегов на основе математической модели их морфологической структуры показал, что в однородных физико-географических условиях должно происходить монотонное во времени (t) уменьшение их средних размеров

$$h(u) = \frac{a}{2 - e^{-\lambda a u}},$$

где λ - среднее число циркообразных форм, возникающих за единицу времени на единице длины береговой линии; при этом средний размер и средняя линейная плотность расположения циркообразных форм стремятся к некоторым предельным значениям.

Таким образом, морфологическая структура абразионно-термоденудационного берега, находясь в постоянном изменении, тем не менее, при значительном времени развития имеет стационарное распределение размеров циркообразных форм, их постоянные средний размер и среднюю плотность расположения, то есть, находится в состоянии динамического равновесия.

При прогнозе отступания береговой линии и прогнозе оползневых процессов на абразионно-термоденудационных берегах криолитозоны важно знать распределение размеров возникающих молодых циркообразных форм, но распределение размеров существующих циркообразных форм, которое можно получить по снимкам, не совпадает с распределением размеров возникающих молодых форм. Однако, на основании приведенных зависимостей получено выражение, дающее принципиальную возможность определить без стационарных наблюдений по наблюдаемой на снимке по материалам однократной космической съемки морфологической структуре абразионно-термоденудационных берегов вероятностное распределение размеров возникающих молодых циркообразных форм, необходимое для прогнозирования отступания берега.

Часть полученных результатов была проверена и дополнена с помощью измерений по материалам повторных высокодетальных космических съемок на ключевых участках с различными физико-географическими и геокриологическими условиями, расположенными в пределах полуостровов Канин, Гыдан, Ямал.

ПРИБРЕЖНО- И ЛАГУННО-МОРСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ СТРУКТУР НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ (ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ)

Гаврилов А.В., Пижанкова Е.И.
МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, Москва
gavrilov37@bk.ru

Современное глобальное покрытие Esri WorldImagery представляет собой мозаику из космических снимков (КС) с пространственным разрешением до 1,7 м. Поэтому на нём находит отражение микрорельеф, свойственный криогенным образованиям, включая полигонально-жильные структуры (ПЖС). На этой мозаике в настоящее время отображается крупнополигональный микрорельеф в береговой зоне арктических морей, предположительно связанный с указанными структурами, формирующимися в засоленных прибрежно- и лагунно-морских отложениях. Целью исследований являлось установление фациальных условий формирования этих отложений и закономерностей их распространения. Методика исследований строилась на основе совместного анализа спутниковых и наземных данных. Наземные данные представлены сведениями о строении и засоленности полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) на Ямале, о. Белый, в низовьях р. Колымы, на о. Хейса (Земля Франца Иосифа), вмещающих отложениях с засоленностью от 0,4 до 2 г/л. Крупнополигональный микрорельеф, являющийся индикатором сингенетических ПЖЛ в морских отложениях, был отмечен только в низовьях Колымы.

Крупный размер имеют полигоны на косах лагуны Нерпалах острова Котельный, побережья о. Банкс Канадского арктического архипелага и во многих других местах береговой зоны арктических морей. Исследования на о. Котельном показали ряд выразительных гидрологических явлений теплого сезона. Об их масштабе можно судить по расходу соленой морской воды, перетекающей из моря в лагуну и обратно по одной из морозобойных трещин в сезонно-талом слое во время прилива и отлива (10-15 л/сек). В донных осадках мелководных лагун ледяные жилы, как правило, летом вытаивают, образуя заполненные водой протяженные канавы. В удаленной от моря внутренней зоне характерно образование сезонных водоносных горизонтов мощностью 0,2-0,5 м с пресными водами, существующими в морозобойных трещинах с июня по сентябрь.

Для фаций пересыпей западного побережья губы Буор-Хая моря Лаптевых, отгородивших лагуны от моря и превративших их в озера Гавриил-Кюэле и Хабырыс-Кюэле, получено семь датировок ^{14}C от 4,3 до 1 тыс. л.н. [2]. Пересыпи представлены системами береговых валов, поднятых над современным уровнем моря на 3-4 м. Береговым валам (по космическим данным) свойственен крупнополигональный микрорельеф современного вида с поперечником полигонов до 100-150 м. На основании этих данных все выделяемые по мозаике из космоснимков полигонально-жильные структуры и вмещающие их отложения подразделяются на два стратиграфо-генетических комплекса: 1) комплекс позднеголоценовых–современных отложений и 2) ранне- среднеголоценовых отложений. Первый отображается на космоснимках четким крупнополигональным микрорельефом. Второй перекрыт субаэральными образованиями, которым в западном секторе евразийской Арктики свойственны субаэральные ПЖЛ, описанные на Ямале, о. Белом и Гыдане. В восточном секторе описаны ПЖЛ в засоленных (до 2 %) осадках с минерализованными (до 4,5 г/л) текстурными льдами в тыловом шве голоценовой морской террасы [1]. Описан и соответствующий им крупнополигональный микрорельеф с размерами полигонов 70-100 м.

В результате исследований на этапе современного потепления выделены следующие фации и стратиграфо-генетические комплексы отложений с полигонально-жильными структурами:

1) комплекс ранне-среднеголоценовых прибрежно-морских и лагунных отложений;
2) комплекс позднеголоценовых-современных отложений:
   а) лагунных,
   б) прибрежно-морских (формирующихся прибрежно-морских террас),
   в) аллювиально-морских (за счет ветровых нагонов);
3) комплекс голоценовых прибрежно-морских отложений областей оледенений;
4) участки дегляциации современных полярных ледников

1. Зайцев В.Н. Закономерности формирования мерзлотно-геологических условий и особенности современного повторно-жильного льдообразования на территории приморских низменностей Якутии. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М., Изд-во МГУ, 1976, 25 с.

2. Правкин С.А., Зандер Л., Папенмайер С., Михаэлис Р., Христофоров И.И., Данилов К.П., Большиянова О.Д., Большиянов Д.Ю. Рельеф и современная тектоника юго-западного побережья губы Буор-Хая, море Лаптевых // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 5., СПб, 2019, с. 22-26.

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ПРОМЕРЗАНИЯ-ПРОТАИВАНИЯ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЧНОГО ПЕСКА

Гололобова А.Г.[1,2], Королева Е.С.[2,3], Мельников А.Е.[2]
[1] Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск
[2] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
[3] ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», Салехард
nuta0687@mail.ru

Процесс промерзания-протаивания развивается как в мерзлотных почвах, так и в почвах умеренного климата. Наибольший эффект от циклического промерзания традиционно описывается в изменении гранулометрического состава, а именно в увеличении количества зерен пылеватой размерности. Меньше внимания уделяют сопровождающим дробление зерен процессам гидролиза минералов, разрушения органического вещества, разрушения и образования агрегатов. Предварительное исследование опубликованных данных показало, что упорядоченной системы знаний об изменениях происходящих в профиле почв при воздействии циклического промерзания-протаивания по мере изменения амплитуды колебания температуры, обводненности профиля, типа почвообразующей породы на данный момент нет.

Целью данного исследования было определить, как процессы циклического промерзания-протаивания повлияют на физико-химические параметры аллювиального песка. Для первых экспериментов в качестве модельной смеси была выбрана фракция 0,31-0,16 мм аллювиального песка р. Лены. Просеянный песок помещали в сосуды-параллелепипеды размером 70*70*200 мм, заливали дистиллированной водой до полного водонасыщения.

Циклическое промерзание-протаивание образцов проводили с помощью морозильных камер на базе станции ИМЗ СО РАН в г. Нерюнгри. Для контроля температурного режима в камере и образцах использованы лабораторные термометры с возможностью непрерывного измерения температуры. За 11 месяцев циклического промораживания-протаивания получены образцы после 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 циклов. Для образцов уже получены данные изменения влажности, pH, состава подвижных форм микроэлементов (в вытяжке 0.5 H HNO_3), гранулометрического состава.

Результаты показали, что изучаемые физико-химические свойства аллювиального песка изменяются по-разному по мере увеличения циклов промерзания-протаивания.

С 1 цикла по 10 цикл pH образцов резко понижался от 8.1 до 3.8, далее после 15 цикла повысился до 6.3 и оставался неизменным до 50 цикла. Значения $C_{орг}$ с 1 цикла по 10 цикл постепенно увеличивались с 0.18% до 0.41%, затем резко уменьшались до 0.10% на 20 цикле, но далее каждый цикл до 50-го наблюдаются небольшие колебания от 0.10 до 0.20%. Содержание физической глины (< 0.01 мм) незначительно увеличивается с 1 цикла по 3 цикл и далее обратно уменьшается. Содержание физического песка (> 0.01 мм) варьирует в небольших пределах от 96.4 до 95.7%.

Распределение подвижных микроэлементов по мере увеличения циклов промерзания-протаивания изменилось, но степень этих изменений отличается для элементов (Рисунок 1). Поведение Cu и Zn похоже: с 1 до 10 цикла их содержание постепенно уменьшалось, а потом увеличивалось вплоть до 50 цикла. Содержание Pb, Cd, Co и V до 10 цикла практически неизменно, далее резко уменьшилось к 15 циклу после чего не изменяется до 50 цикла. Содержание Ni равномерно снижалось с 1 по 50 цикл. В начале циклического промерзания-протаивание содержание Mn практически не меняется, резко увеличиваясь с 10 цикла и далее имеет бимодальный характер распределения, уменьшаясь к 50 циклу. Значение Cr с 1 цикла резко повышается на 2 цикле, затем резко уменьшается к 3 циклу и далее не меняется. As сильных изменений не испытывает.

Различное поведение подвижных элементов в образцах аллювия свидетельствует, что даже незначительное изменение гранулометрического состава образца сопровождает комплекс химических реакций. Набор химических реакций не постоянный и меняется по мере увеличения количества циклов промерзания-протаивания неравномерно. Результат наибольшего разнообразия химических реакций наблюдается на 1-10 циклах, т.к. происходит значительный сдвиг от слабощелочной среды к сильнокислой, а на 10-15 циклах - к нейтральной. Полученные результаты - первые в большом цикле работ. Они помогут объяснить и предвидеть изменения физико-химических свойств и подвижности микроэлементов в породах и почвах, подвергающихся циклическому промерзанию-протаиванию.

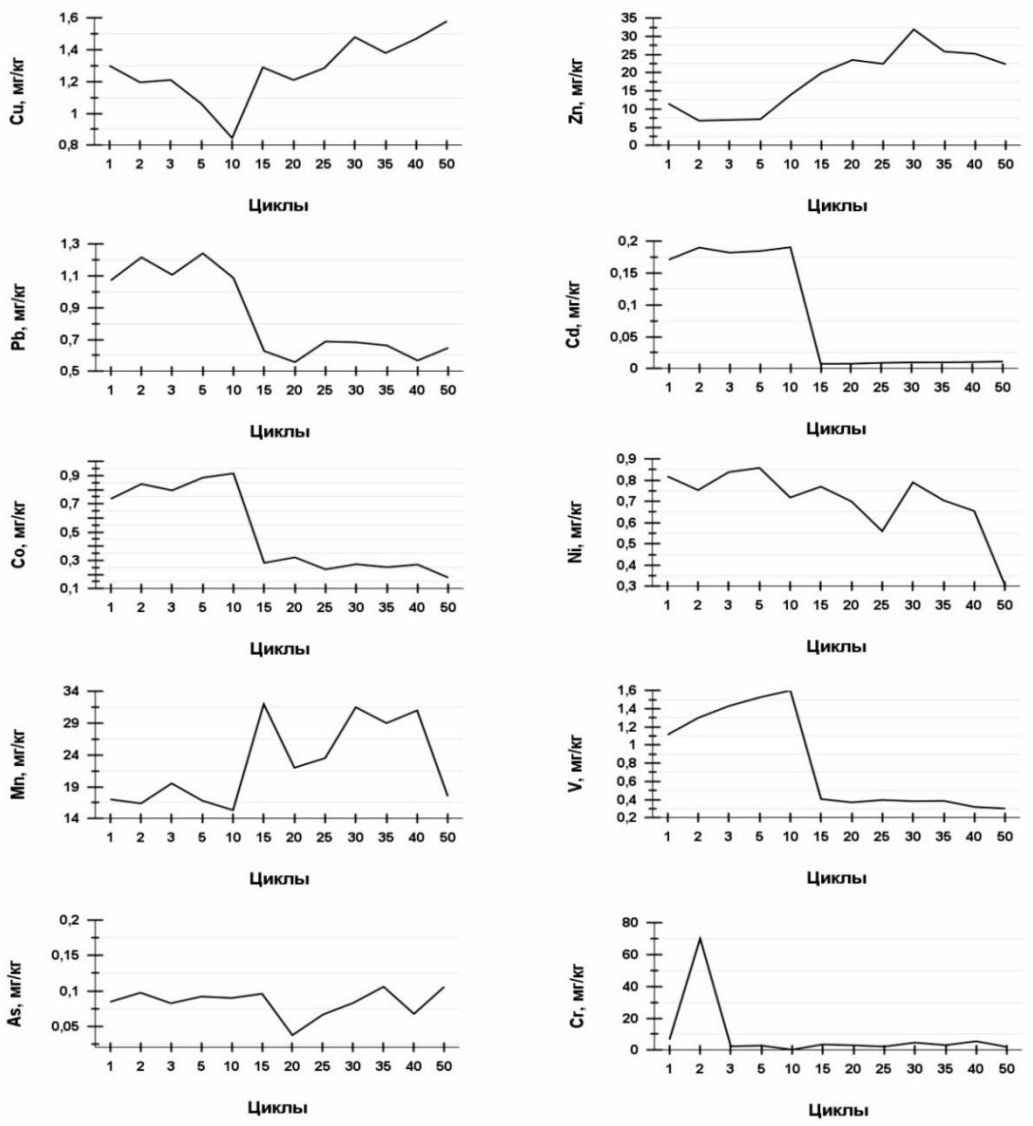


Рис. 1. Распределение микроэлементов при циклическом промерзании-протаивании

Полевые исследовательские работы выполнены в рамках проекта госзадания Минобразования РФ FUFG-2024-0007 «Мантийный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования». Модельный опыт и химико-аналитические работы выполнены по проекту РНФ №23-77-10046 «Роль криогенеза в формировании микроморфологических признаков почв и отложений».

ЭЛЕКТРОКОАЛЕСЦЕНЦИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ НА ГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Джуманджи В.А., Шавлов А.В., Яковенко Е.С.
Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень
varjum@yandex.ru

Капли воды микронного размера образуются в атмосферных облаках вследствие охлаждения и конденсации водяного пара на активных ядрах конденсации. В результате конденсации и диффузии пара, капли могут достигать радиуса 10 мкм. Капли радиусом более 50 мкм растут за счет гравитационной коалесценции, благодаря высокой скорости падения, столкновения и слияния с каплями меньшего размера. Неясен механизм роста капель с 10 до 50 мкм. В облаках процесс образования дождевых капель требует всего 15-20 минут, а существующие теории предписывают единицы-десятки часов. В литературе имеются сообщения об ускоренном росте капель за счет электрокоалесценции. Но этот механизм недостаточно изучен из-за трудности регистрации положения и размеров капель в воздушном потоке.

Целью настоящей работы явилось экспериментальное исследование закономерностей электрокоалесценции капель воды на гидрофобной диэлектрической поверхности. Такие капли служили грубой моделью капель воды в облаке. Фиксация положения капель на гидрофобной поверхности делала удобной их фоторегистрацию.

Капли воды получали на внутренней поверхности прозрачного герметично закрытого пластикового 5 литрового контейнера. Внутреннюю поверхность контейнера тщательно мыли, сушили и наполовину заполняли бидистиллированной водой, Рис. 1. Суточные колебания температуры воздуха в лаборатории вызывали конденсацию водяных паров на внутренней свободной поверхности контейнера. Средний размер капель увеличивался в течение 1-3 суток, достигая радиуса 1-2 мм. Размеры капель регистрировали по фотоизображениям с относительной погрешностью 10 %.

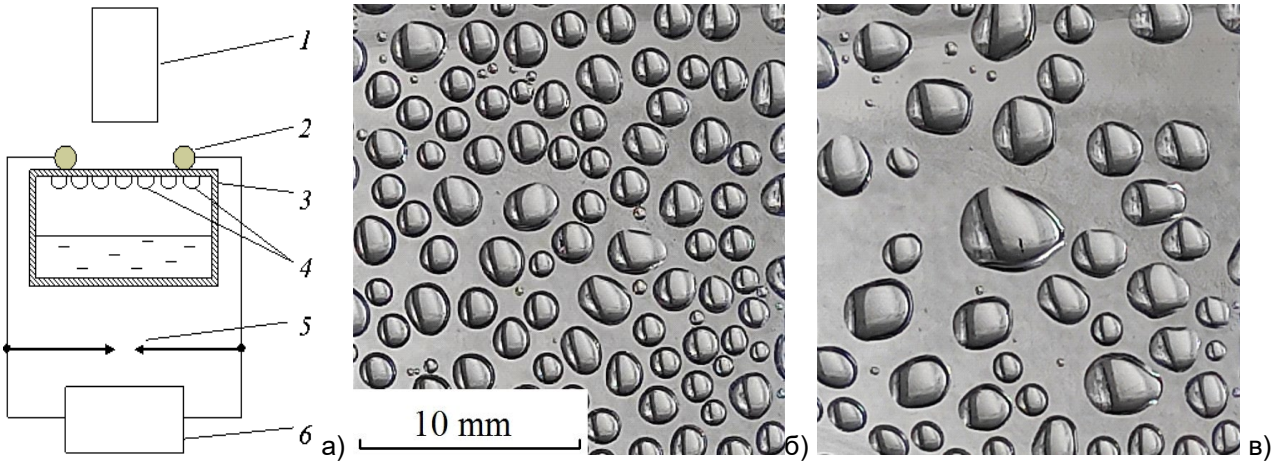


Рис. 1. Блок-схема установки. 1 – фотокамера, 2- цилиндрический электрод, 3 – пластиковый контейнер с водой, 4 – капли воды, 5 – разрядник, 6 – электростатическая машина (а). Капли воды на стенке пластиковой бутылки до приложения высокого напряжения (б), после приложения высокого напряжения (в).

Электрическое поле к системе капель прикладывали снаружи пластиковой поверхности с помощью двух параллельных цилиндрических электродов, покрытых изоляцией. Радиус каждого электрода вместе с изоляцией составлял 1 мм, длина электрода равнялась 20 мм, межэлектродное расстояние равнялось 20 мм. Напряжение к электродам подавали от электрофорной машины, раскручиваемой до возникновения периодических электрических пробоев в разряднике. Поэтому, прикладываемое к системе капель напряжение было импульсным. Максимальная величина напряжения 60 кВ. В опытах сначала прикладывали минимальное напряжение в течение 3-5 секунд путем установления разрядного промежутка минимальной величины ~1 мм, фотографировали капли, затем напряжение увеличивали, снова фотографировали и так далее, до тех пор, пока не происходила массовая коалесценция капель. Весь цикл электрических измерений на одном образце капель занимал около 5 минут. Систематическую погрешность определения напряжения оценивали в 10%. Случайная погрешность была в несколько раз меньше.

На Рис. 2 изображена зависимость критической напряженности электрического поля E_c, при которой наблюдалась массовая коалесценция капель, от среднего радиуса капель r.

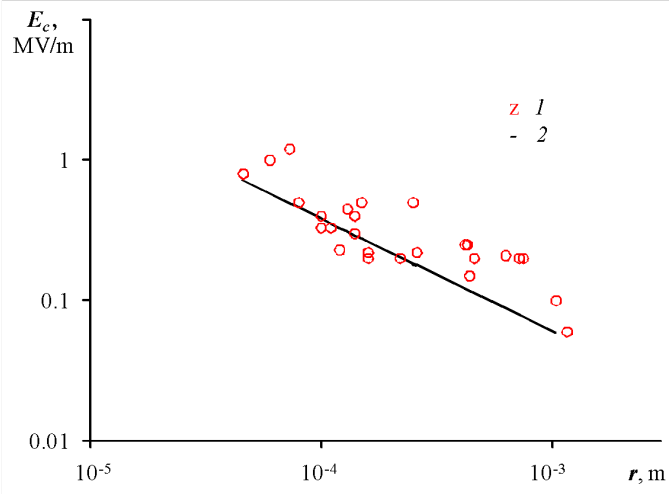


Рис. 2. Зависимость критической напряженности электрического поля E_c от среднего радиуса капель r. (*1*) – экспериментальные значения, (*2*) – теоретическая кривая.

Критическая напряженность поля уменьшается с увеличением среднего радиуса по закону $E_c \sim r^{0.8}$. Относительно механизма электрокоалесценции можно утверждать, что он не является следствием диполь-диполного взаимодействия, поскольку, направление движения капель при слиянии не привязано к ориентации линий электрического поля. Предложен механизм электрокоалесценции, основанный на диаграмме состояний капельно-ионной плазмы [1]. Согласно диаграмме, энергетически выгодное расстояние между каплями уменьшается с увеличением заряда капель до тех пор, пока оно не станет меньше, чем межмолекулярное расстояние в воде, равное 10^{-10} м. В этом случае капли коалесцируют. Электрический заряд капель индуцирован внешним электрическим полем. На Рис. 2 изображена теоретическая кривая *2*, построенная на основе этого механизма. Она удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными *1*. Электрокоалесценция капель протекает при напряженности поля 0.1-1 МВ/м. Этот интервал значений напряженности лежит ниже пробойного значения напряженности в воздухе, 3 МВ/м. Таким образом, электрокоалесценция капель в атмосферных облаках может предшествовать или протекать наряду с электрическими разрядами.

Полученные результаты могут способствовать поиску «электрических» технологий управления, например, интенсивностью осадков в засушливых районах. Интересны технологии прогнозирования сильных осадков в городах на основе данных мониторинга электрического состояния облаков и сведений из диаграммы состояния капельно-ионной плазмы.

Работа выполнена в рамках госзадания FWRZ-2021-0007.

[1] A. V. Shavlov, V. A. Dzhumandzhi, A. A. Yakovenko, Technical Physics 66(9) 1041(2021).

ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ И СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ В ЗАПАДНОМ ПРИЛАДОЖЬЕ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД 2024/25 ГГ.

Коровина Д. И., Кузякин Л.П., Платонов И.А., Швед В.А.,Дунаев А.В., Дергунов И.В., Мартиросян М.О., Рытикова Н.В., Самохвалов Н.Д., Стрелецкая И.Д.
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
dasha.korovina1998@gmail.com

В феврале 2025 года была организована экспедиция кафедры Криолитологии и гляциологии в Западное Приладожье на базу «Ладога» Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Ввиду того, что средняя температура января в регионе превысила норму на 4,6°С, была определена цель экспедиции: изучение последствий аномально теплой зимы 2024–2025 гг. для снежного покрова, ледовых образований Ладожского озера и слоя сезонного промерзания.

Территория исследований расположена вблизи посёлка Ладожское озеро на заболоченной озёрной террасе, сложенной с поверхности валунными суглинками, реже – мелкозернистыми песками. Климат района умеренный, переходный от морского к континентальному, характеризуется значительными колебаниями температуры воздуха, высокой относительной влажностью, облачностью и большим количеством осадков (380–490 мм).

Исследование снежного покрова проводилось методом шурфования и снегомерной съёмки по профилям. Для изучения деятельного слоя были заложены шурфы в различных природно-территориальных комплексах. В снежных и грунтовых шурфах, помимо структурного и текстурного описаний, проводились термометрические измерения, а также отбирались образцы природных вод (талый снег, грунтовые воды, поверхностные воды) для анализа их ионно-солевого состава. Был проведён отбор газовой составляющей включений воздуха из озёрного льда методом HeadSpace для оценки возможности миграции метана из озёрной воды. Однако, из-за отсутствия устойчивого ледового покрова на озере, для анализа были использованы отдельные фрагменты озёрного льда и припая, обнаруженные на берегу. Газохроматографический анализ углеводородных газов и хроматографический анализ природных вод выполнен в лаборатории ВНИИОкеангеологии на газовом хроматографе Shimadzu GC 2014.

По данным о температуре воздуха, наиболее «аномальным» на фоне зимы 2024–2025 гг. получился январь. В середине января на м/с Шлиссельбург высота снежного покрова составляла 49 см, однако, к концу месяца она уменьшилась до 1 см. Таким образом, в начале исследований снежный покров залегал фрагментарно. Однако, в период со 2 по 6 февраля прошёл ряд снегопадов, увеличивший среднюю высоту снежного покрова до 26 см (в результате ветрового перераспределения снега минимум составил 6 см, максимум – 69 см).

Стратиграфия снежного покрова в большинстве точек была представлена тремя слоями. Верхний слой был сформирован из свежевыпавшего снега с размером кристаллов менее 2 мм и плотностью менее 0,1 г/см^3. Средний слой был представлен инсоляционной (или адвекционной) коркой, толщиной до 4 см. Нижний слой, как правило, состоял из оплавленных и смерзшихся снежных кристаллов (размером более 2 мм и плотностью до 0,4 г/см^3), подвергнутых нескольким циклам таяния-замерзания. Преобладающие типы метаморфизма снежной толщи – изотермический и таяния-замерзания.

Геохимический анализ расплава снежного покрова показал, что свежевыпавший снег более минерализован (до 30 мг/л), чем более старые горизонты (до 12 мг/л). Для сравнения: минерализация воды в Ладожском озере составляет 45 мг/л, а в грунтовой воде на пляже – 200 мг/л. В свежевыпавшем снегу наблюдается повышенное содержание ионов Na^+ и Cl^-, в то время как старый снег характеризуется ионами SO_4^{2-} и Ca^{2+}. Можно предположить, что старый снег был сформирован над континентом (или Ладожским озером), а новый снег сформировался над Балтийским морем (Атлантическим океаном), что отразилось в доминирующих ионах.

Было запланировано изучение льда Ладожского озера, но по причине аномально тёплой зимы не произошло формирование устойчивого ледового покрова. Тем не менее, сформировался ледяной береговой вал высотой до 2 м. Стратиграфия вала была представлена 5 слоями. Вал состоял преимущественно из крупных ледяных кристаллов (более 6 мм) – замёрзшие брызги от волн, а также включал в себя крупные ледяные фрагменты (битый лёд) диаметром до 30 см. Подобная форма торошения льда не характерна для Ладожского озера и формируется только в годы отсутствия устойчивого ледового покрова.

В районе проведения исследований располагалась ледовая трасса «Дорога Жизни», которая функционировала во времена Великой Отечественной Войны (зимние сезоны 1941-1943 гг.). В связи с этим, было проведено сравнение температурных условий зимних периодов 1941-1944 гг. и 2021-

2024 гг. Данные для 1941-1944 гг. были взяты из реанализа ERA5 и верифицированы по метеостанции г. Санкт-Петербург (корреляция 0,97). Данные за период 2021-2024 гг. получены с метеостанции Шлиссельбург, расположенной в 20 км к югу от района исследования. Сравнение этих двух периодов показало, что температуры зим 80 лет назад были значительно ниже последних лет, что позволило образовать ледовую трассу, которая стала единственным средством коммуникации с блокадным Ленинградом.

Несмотря на незначительную толщину снежного покрова в зимний период, высокие температуры воздуха не позволили сформироваться сезонномёрзлому слою в большинстве точек исследования. В переувлажнённых грунтовых шурфах под снежным покровом наблюдались положительные температуры – сезонномёрзлый слой полностью отсутствовал. В более дренированных грунтах были зафиксированы отрицательные температуры (на глубину до 5 см), однако непосредственно промерзания (льдовыделения) не зафиксировано. Только в песчаных отложениях вблизи береговой линии озера было зафиксировано промерзание на глубину до 10 см. Криотекстура сезонномёрзлого слоя – массивная.

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания №121051100164-0 «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ПЕСКАХ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

А.А. Куть, Т.В. Романис, А.Е. Мельников
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
Россия, РС (Я), г. Якутск, 677010, ул. Мерзлотная, 36

Криогенные процессы, связанные с многократным промерзанием и оттаиванием минеральных материалов, играют ключевую роль в формировании свойств грунтов и горных пород в условиях холодного климата. Изучение этих процессов имеет важное значение для понимания механизмов преобразования структуры и состава дисперсных сред, а также для прогнозирования их поведения в природных и техногенных условиях.

Для проведения экспериментальных исследований, направленных на установление признаков преобразования минерального материала в ходе криогенеза, была разработана специализированная установка, с помощью которой к настоящему времени были получены образцы, подвергшиеся 1, 2, 3, 5, 10 и 15 циклам промерзания-оттаивания. Первые результаты анализа образцов, прошедших 1 и 10 циклов, уже позволяют сделать предварительные выводы о характере и интенсивности преобразований минерального материала под воздействием криогенных процессов.

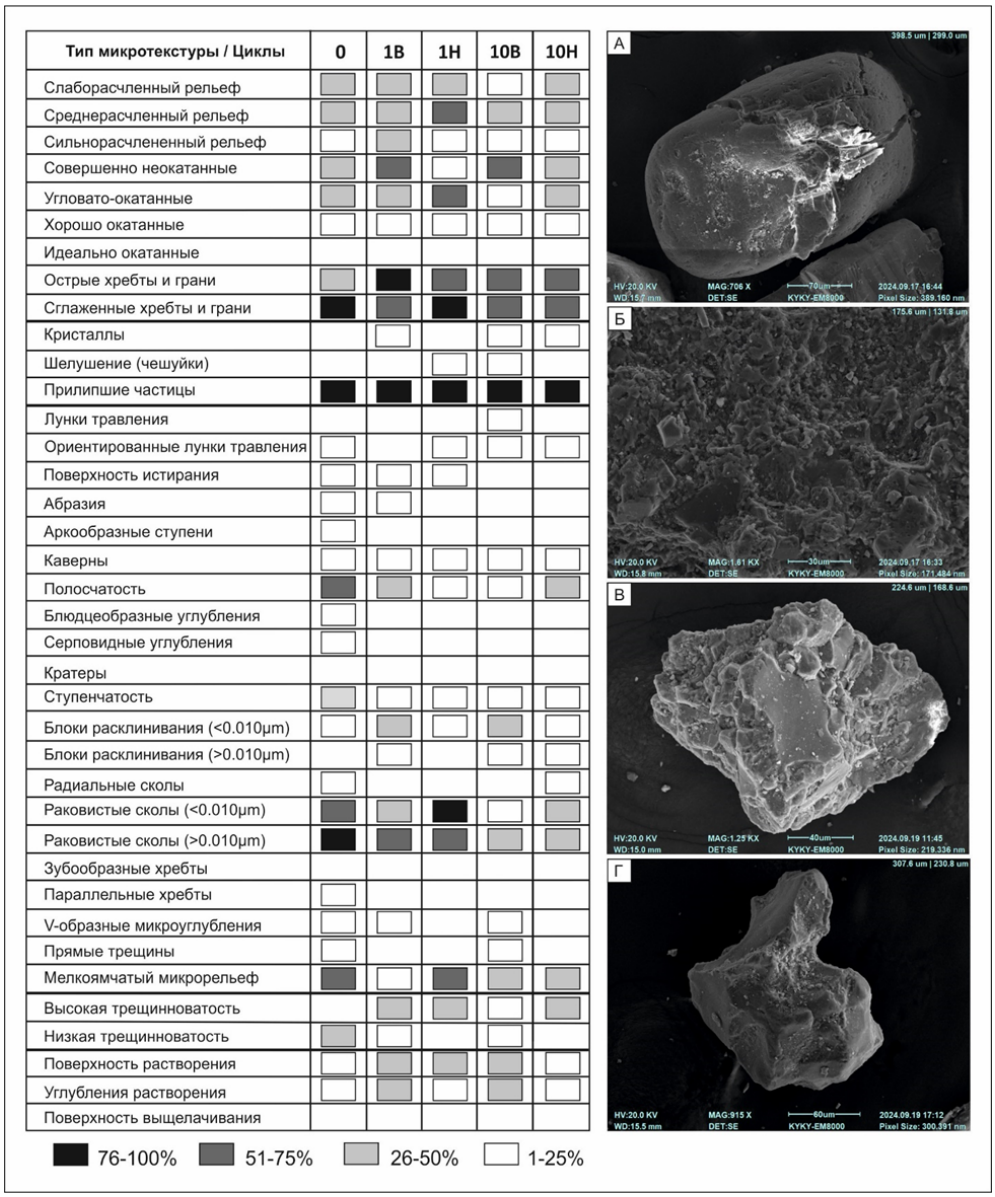
Исследование образцов после 1 цикла промерзания и протаивания показали резкое изменение отдельных микроморфологических признаков. Увеличилась степень расчленненности рельефа зерна и изменилась степень окатанности зерен (от окатанных в сторону угловато-окатанных и совершенно неокатанных). Что касается, текстурных элементов на поверхности, их доля присутствия значительно сокращается.

Отдельно нужно отметить увеличение доли свежих сколов различных форм и размеров на поверхности зерен после 1-го цикла. В фоновых пробах доля сколов достигала 84,2%. Поверхность сколов осложнена вторичными элементами, чаще мелкоямчатыми микрорельефом, трещинами и скоплением частиц кремнезема. В пробах, прошедших цикл промерзания и протаивания, сколы свежие, без присутствия вторичных элементов. Среди частиц в составе образца, претерпевших цикл промерзания и протаивания, были отмечены расколотые зерна. Наличие таких частиц относится к прямым признакам криогенного разрушения.

В образце, прошедший 10 циклов промерзания и протаивания, таких значительных изменений отмечено не было. Степень окатанности зерен изменилась незначительно: увеличилась доля совершенно неокатанных зерен с 44,2 до 55% за счет разрушения угловато-окатанных зерен. Закономерно сократилась доля зерен со слаборасчлененным рельефом с 42,3 до 25%. Было отмечено повышение трещинноватости поверхности части. Также сократилась доля вторичных признаком, таких мелкоямчатый микрорельеф, следы истирания, абразии, аркообразные ступени, различные сколы и др.

Таким образом, следует отметить, что следы разрушения зерен при циклическом промерзании и протаивании присутствуют в образцах. Признаками криогенного разрушения в данном случае является увеличение содержания совершенно неокатанных зерен и степени расчлененности рельефа, а также наличие свежих сколов и расколотых частиц. Резкое увеличение доли вышеотмеченных признаков в образце после 1-го цикла по сравнению с 10-м говорит о том, что при первичном промерзании и протаивании разрушаются более «хрупкие» зерна и высокой степенью трещинноватости.

Таблица. 1. Признаки криогенного происхождения: А – раскол частицы кварца; Б – раковистые сколы на поверхности зерна, покрытого коркой кремнезема; В – свежие сколы на поверхности зерна кварца с сильнорасчлененным рельефом; Г – зерно кварца неправильной формы.



Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ по проекту № 23-77-10046 «Роль криогенеза в формировании микроморфологических признаков почв и отложений».

ВЛИЯНИЕ РАЗВИТИЯ ТЕРМОЦИРКОВ НА ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОГО ЯМАЛА

Левочкина О.В.[1], Ванштейн Б.Г.[2], Дворников Ю.А.[3,4], Киль А.О.[2], Лейбман М.О.[1], Письменюк А.А.[5], Семенов П.Б.[2], Тарасевич И.И.[1,5], Хомутов А.В.[1]

[1] *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия*

[2] *ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия*

[3] *Лаборатория Смарт-технологии устойчивого развития городских экосистем в условиях глобальных изменений, РУДН, Москва, Россия*

[4] *Лаборатория карбомониторинга наземных экосистем ИФХИБПП РАН, Пущино, Россия*

[5] *МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

levochckina@yandex.ru

Изучение динамики криогенных процессов в Арктике приобретает все большую актуальность на фоне тренда повышения температуры. В пределах Центрального Ямала, благодаря особенностям его рельефа и криогенного строения пород, наиболее распространенным процессом является термоденудация, активизация которой наблюдается с 2012 г. (Бабкина и др., 2019). В результате развития термоденудации образуются особые формы рельефа – термоцирки. На Центральном Ямале термоцирки формируются преимущественно на берегах озер, что приводит к переносу большого количества материала из зоны активности термоцирка напрямую в водоемы.

В пределах научно-исследовательского стационара «Васькины Дачи» сотрудниками Института криосферы Земли ведутся многолетние исследования динамики развития термоцирков (Хомутов и др., 2017; Тарасевич и др., 2022; Хомутов и др., 2024), показана связь геохимического состава озерных вод с развитием термоцирков (Дворников и др., 2017, Факащук и др., 2023). Однако механизм переноса вещества в системе «водосбор-озеро» в результате развития термоцирков изучен недостаточно.

Целью данной работы является выявление механизма перемещения материала в ходе развития термоцирков в озера и характеристик сформировавшихся в результате донных отложений. Для этого производилась количественная оценка состава отложений, слагающих склоны, материала, переносящегося в результате развития термоденудации, донных отложений озер и состава вод. В пределах трех термоцирков, находящихся на разных стадиях развития, в районе стационара проводилось криолитологическое описание обнажений, отбор проб отложений, подземных льдов и воды (Левочкина и др., 2023). Гранулометрический и геохимический состав отложений определялся в лаборатории ВНИИОкеангеологии (г. Санкт-Петербург).

В работе представлены результаты анализа полученных за 2021 (Письменюк и др., 2021) и 2023 гг. данных. Анализ гранулометрического и геохимического состава отложений позволил предварительно выделить закономерности, характерные для участка исследований. Гранулометрический состав донных отложений озер вблизи берегов, не подверженных интенсивной термоденудации, имеет схожий характер и отличается для озера, в пределах которого интенсивно развивается термоцирк, существенным повышением содержания песчаной фракции. Состав материала, перемещающегося по днищу термоцирка, определяется интенсивностью потока, а также деятельностью ручьев дождевых и талых вод. Концентрации основных ионов (Na, K, Ca, Mg, Cl) в ручьях значительно превышают концентрации в озерах, что, вероятно, существенно определяет динамику химического состава озерных вод.

Работа выполняется Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факащук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 99-109.

Дворников Ю.А., Лейбман М.О., Хайм Б., Хомутов А.В., Рёсслер С., Губарьков А.А. Термоденудация на Ямале-источник увеличения концентрации растворенного органического вещества в озерах // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21. – №. 2. – С. 33-42.

Левочкина О.В., Лейбман М.О.., Тарасевич И.И. и др. Воздействие склоновых криогенных процессов на водные экосистемы Центрального Ямала // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-запада России. – 2023. – № 10. – С. 175-180. – DOI 10.24412/2687-1092-2023-10-175-180. – EDN NJKYBL.

Письменюк А.А., Семенов П.Б., Тарасевич И.И., Лейбман М.О., Бабкин Е.М., Нестерова Н.Б., Малышев С.А., Стрелецкая И.Д., Шатрова Е.В., Хомутов А.В. Исследования четвертичных отложений и подземных льдов центрального Ямала // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. Выпуск 8. С. 173-176. doi: 10.24412/2687-1092-2021-8-173-176.

Тарасевич И.И., Кизяков А.И., Лейбман М.О., Письменюк А.А., Нестерова Н.Б., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Динамика термоденудации на Центральном Ямале за 2017-2021 гг. по данным ежегодного мониторинга // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 9, 2022, С. 253–257.

Факащук Н. Ю., Дворников Ю.А., Опокина О.Л., Хомутов А.В. Влияние процессов термоденудации на ионный состав малых озер Центрального Ямала // Криосфера Земли. – 2023. – Т. 27. – № 4. – С. 14-23. – DOI 10.15372/KZ20230402. – EDN QSJNXA.

Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А. Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг. Проблемы Арктики и Антарктики. 2024;70(2):222-237.

Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Губарьков А.А., Хайруллин Р.Р. Мониторинг термоденудационных процессов на полуострове Ямал полевыми и дистанционными методами //Современные проблемы географии и геологии. – 2017. – С. 190-194.

ТЕРМИНОЛОГИЯ И КЛАССИФИЦИРОВАНИЕ КРИОГЕННО-ОПОЛЗНЕВЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА

Лейбман М.О. [1], **Кизяков А.И.** [2], **Нестерова Н.Б.** [3,4], **Тарасевич И.И.** [1,2]
[1] *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия*
[2] *Московский Государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия*
[3] Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, г. Потсдам, Германия
[4] University of Potsdam, г. Потсдам, Германия
moleibman@mail.ru

Система терминов в нашей описательной науке заменяет систему уравнений в точных науках. Следовать системе терминов важно и в техническом отношении – чтобы находить нужные публикации по ключевым словам.

Тенденция в научных исследованиях к мульти-дисциплинарности, в целом положительная, приводит к одному существенному недостатку – сторонние по отношению к отрасли науки исследователи вносят в неё свою терминологию, обозначая объекты (в том числе имеющие однозначные дефиниции) разными словами, иногда новым переводом иноязычных терминов. В этом заключается необходимость определиться с терминологией, а заодно и классификацией термоденудационных процессов и образований, активизация которых наблюдается последние десятилетия и стала темой десятков публикаций от Канады до Тибета.

В попытке унифицировать терминологию термоденудации мы пришли к следующей схеме. Термин «термоденудация» оставили для обозначения всего комплекса процессов, связанных с вытаиванием подземного льда со сносом оттаявшего материала вниз по рельефу по аналогии с термином «денудация». Склоновые процессы в криолитозоне мы ранее разделили на медленные (солифлюкция, крип) и быстрые (криогенное оползание) [1]. Быстрые процессы проявляются в специфических формах рельефа. Вводим термин криогенно-оползневые формы рельефа (КОФР) [2]. В зависимости от типа движения материала вниз по склону выделяем криогенные оползни скольжения (КОС) и соответствующую комплексную форму рельефа называем КОСФР (ранее называли оползневым цирком [1]). Аналогично, криогенные оползни течения (КОТ) образующие комплексные формы рельефа, обычно называемые «термоцирки», предлагаем называть КОТФР. Необходимость введения новых терминов обусловлена трудностью, с которой мы столкнулись при классифицировании большого числа КОТФР с отличными от термоцирков очертаниями, также сформированных КОТ, а именно, термотеррас и комплексных форм из сочетания термоцирков и термотеррас.

До лета 2012 г. на севере Западной Сибири на морских побережьях преобладали КОТ, в то время как вдали от побережий преобладали КОС [1]. Мы предположили, что со временем возможна смена типа процесса вдали от побережий с КОС на КОТ как в ложах КОСФР, так и на стабильных склонах. Причина этого, как правило, увеличение глубины протаивания или усиленная потеплением активизация деструктивных процессов на склонах (термоэрозия, нивация, солифлюкция). В результате зона протаивания достигает кровли подземного залежеобразующего льда.

С лета 2012 г. преобладающий генетический тип криогенного оползания изменился, в активной фазе преобладают КОТ. Основным фактором пространственного распространения этого процесса является глубина залегания залежеобразующих подземных льдов. Помимо анализа причин и триггеров процесса криогенного оползания потребовалось обновить также представления о результирующих формах рельефа, образованных КОС или КОТ, поскольку появилось множество новых публикаций с их описанием.

Анализ публикаций показал, что существует значительная терминологическая неопределенность как в русскоязычных статьях, так и в англоязычных. Разные научные группы пользуются разными терминами для обозначения одних и тех же объектов. КОТФР, как и процесс их формирования, в зарубежных работах именуются, как правило, *retrogressive thaw slumps (RTS)* или *slope thermokarst* [3].

Дополнительные сложности связаны с соотношением русских и английских терминов вообще и для КОФР в частности. Это относится как к «потерям» публикаций при поиске по английским ключевым словам, так и в понимании, о чем статья, если описания объектов ведутся несовпадающими терминами.

Предлагаемая детальная классификация ограничивается формами рельефа, образованными КОТ и обозначенными нами как КОТФР, поскольку детальная классификация КОС была предложена ранее [1]. КОСФР развиваются крайне медленно, в течение столетий. Однако, в случае если они вскрывают подземные льды, их следует уже рассматривать как триггеры КОТ, которые развиваются

динамично и множатся, увеличивая размеры образующихся в течение нескольких последовательных лет или десятков лет КОТФР.

Основные показатели и параметры КОТФР, по которым предложена классификация, перечислены ниже. К ним относятся строение и элементы КОТФР (открытые и закрытые КОТФР, их бровки, стенки, ложе и поток); форма бровки – подковообразная очерчивает термоцирк и линейная ограничивает термотеррасу; тип залежеобразующего (сегрегационный, инъекционный, захороненный, полигонально-жильный) или текстурообразующего льда, подвергающегося оттаиванию; положение относительно базиса эрозии (поток спускается к реке, ручью, озеру, морю, или висячий на склоне); степень активности (активная, частично активная, стабильная и древняя в зависимости от вскрытия ледяной стенки или зарастания ложа); различные комбинации КОТФР (кластеры – группы КОТФР, комплексы – разновременные КОТФР, ограниченные единой бровкой, и сочетания – термоцирки и термотеррасы, ограниченные единой бровкой), а также единичные КОТФР; парагенез с другими криогенными процессами, участвующими в эволюции КОТФР, из которых наиболее характерны термоэрозия и нивация, реже термоабразия и термокарст.

Работа выполняется Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

1. Leibman M., Khomutov A., Kizyakov A. Cryogenic landslides in the West-Siberian plain of Russia: classification, mechanisms, and landforms. In: W. Shan et al. (eds.). Landslides in cold regions in the context of climate change. Environmental Science and Engineering. Springer International Publishing, Switzerland; 2014. P. 143–162.

2. Лейбман М.О., Кизяков А.И., Нестерова Н.Б., Тарасевич И.И. Классификация криогенно-оползневых форм рельефа для целей картографирования и прогноза. Проблемы Арктики и Антарктики. 2023; 69(4): 486–500.

3. Nesterova, N., Leibman, M., Kizyakov, A., Lantuit, H., Tarasevich, I.,Nitze, I., Veremeeva, A. and Grosse, G. Review article: Retrogressive thaw slump characteristics and terminology. The Cryosphere 2024, 18(10).

ДИНАМИКА ТЕРМОКАРСТА И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ НА ЮЖНОЙ ГРАНИЦЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА

Лыткин В.М.[1,2], Сивцев М.А. [1,2], Сулейманов А.А.[2]

[1] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
[2] Институт гуманитарных исследований и проблем малочисленных народов Севера СО РАН, Якутск

В зоне распространения многолетнемёрзлых толщ сильнольдистые породы занимают значительную территорию, основная часть которой приурочена к полярным и приполярным районам Восточной Сибири. В Республике Саха (Якутия) такие отложения с объёмной льдистостью 0,4–0,8 занимают 39,8 % от общей территории региона. В условиях современного потепления климата в Арктике сильнольдистые породы в первую очередь чувствительны к изменениям и являются наиболее уязвимыми к деградации. Быстрое повышение температуры воздуха за последние десятилетия негативно сказывается на их тепловом режиме и увеличение глубины сезонного протаивания, что приводит к развитию опасных криогенных процессов. Одним из таких процессов является термокарст, в результате которого происходит сильное проседание поверхности, могут образоваться и расширяться термокарстовые озёра, нарушается растительно-почвенный покров, что может привести к развитию высокодинамичной термоэрозии.

Район исследований расположен в юго-западной части Якутии, на левобережье р. Лена, на расстоянии 6 км к северо-западу от районного центра Олекминского района г. Олекминска. В геоморфологическом отношении он находится в пределах Приленского плато на надпойменной террасе р. Лены высотой 60–65 м. Изучаемая терраса сложена суглинисто-супесчаной толщей с крупными повторно-жильными льдами мощностью до 10 м. Для этой поверхности характерны наличие неглубоких долинообразных западин с неясно выраженными бортами и повсеместное распространение голоценовых аласных котловин с глубиной до 15 м. Климат резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха для ближайшей метеостанции «Олекминск» составляет -6,7°С. Средние январские температуры достигают -32,2°С, а июльские – +18,0°С. Годовое количество осадков в регионе составляет в среднем 315 мм. Согласно мерзлотно-ландшафтному районированию, исследуемый участок находится в пределах Нюе-Олекминской провинции прерывистого распространения многолетнемерзлых пород с мощностью 100-150 м.

Проведенные нами в течение сентября 2019 – сентября 2023 гг. мониторинговые исследования за температурным режимом грунтов на ключевом участке, который расположен на 2 км к северу от населенного пункта Юнкюр, показали, что там, где человеком в ходе хозяйственного освоения территорий не были нарушены естественные природные условия, температурный режим ММП оставался стабильным за весь период наблюдений. Развитие негативных криогенных процессов на таких участках не наблюдалось. Так, в скважине №2 на глубине 3 м среднегодовые температуры грунтов оказались равны -1,2°С и понижаются до -1,4 °С на глубине 8 м. Глубина сезонно-талого слоя составляет 1,8 м и не достигает кровли сильнольдистых грунтов. Данное обстоятельство благоприятно сказывается на устойчивости таких ландшафтов к термокарстовым процессам.

На антропогенно нарушенных участках температуры грунтов оказались намного выше из-за изменения теплобалансового режима поверхности в результате сведения растительного покрова в период хозяйственного освоения данных территорий. Наибольший интерес вызывается температурный режим грунтов на глубине 3 м. На этом горизонте располагается кровля повторно-жильных льдов, изменение которого влияют на развитие и динамику термокарстовых процессов. За период наблюдений средняя температура в нарушенных ландшафтах на этой глубине настабильная, из-за накопления льдонасыщенными грунтами теплоты для фазового перехода и составляет всего -0,3°С, что является очень высоким показателем. В данной скважине минимальные значения на этой глубине фиксируются в начале июня и опускаются до -0,4°С, а максимальные значения наблюдаются в середине сентября и поднимаются до -0,2°С.

Температурный режим пород в нарушенных ландшафтах показали их нестабильное состояние, что отражается на глубине сезонного протаивания, которое составляет для ключевого участка 2,5 м. Это приводит к развитию термокарстовых процессов на таких территориях. На исследованной площадке, наравне с наблюдением температур грунтов, проводились мониторинговые исследования за динамикой термокарстовых процессов с использованием БПЛА. С его помощью нами ежегодно составлялся ортофотоплан и цифровая модель местности для ключевого участка с площадью 0,8 км2 с 2019 по 2023 гг. Полученные первичные материалы обрабатывались в специализированных программах и в результате было установлено ежегодное углубление западин в быллярах. На этом участке дневная поверхность вследствие вытаивания подземных льдов просела

за период 2019–2022 гг. в среднем на 21 см (в 2019–2020 г. на 8 см, в 2020–2021 г. на 6 см, в 2021–2022 гг. на 7 см).

В результате углубления таких западин и их слияния образуются дюёдя. Такие озера в количестве 21 шт встречаются на территории с. Юнкюр. Максимальная площадь их зеркала составляет 10672 м^2, минимальная 620 м^2. За период наблюдений общая площадь зеркала дюёдя с 2019 г. по 2023 г. увеличилась на 19,4%, а территории, охваченной термокарстом – на 10,3 %.

Отмеченные процессы, начало которых местное население относит к 1990-м гг., привели к целому ряду негативных последствий для сложившейся системы жизнеобеспечения в Юнкюре. Прежде всего, последствием деградация ММП в Юнкюре стали деформации жилых и хозяйственных построек. На территории села в область развития современных термокарстовых форм (быларов) попадает, 249 жилых и хозяйственных строений. Часть из пострадавших домов и построек местное население вынуждено регулярно ремонтировать, что сказывается на финансово-экономическое благополучие местного населения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 25-18-20087, https://rscf.ru/project/25-18-20087/).

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ ОПАСНЫХ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЯМАЛА ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ И ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Оленченко В.В., Какуля В.А., Марилов О.К., Федин К.В.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск
OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

В последнее десятилетие на территории Центрального Ямала активизировались газовые выбросы, сопровождающиеся мощным взрывом и образованием воронок (кратеров) глубиной от первых метров до нескольких десятков метров [1-5]. На поверхности тундры этому процессу предшествует рост многолетнего бугра пучения (МБП), который впоследствии и взрывается [3]. Следовательно, генезис таких бугров отличается от механизма образования классических бугров пучения, которых в ямальской тундре насчитывается бесчисленное множество, из них потенциально опасными считаются 7,3 тысячи [3]. Для того, чтобы научится отличать опасные бугры пучения от классических булгунняхов были проведены специальные геофизические и геохимические исследования на нескольких буграх Центрального Ямала.

Методы исследования включали электротомографию, микросейсмический мониторинг и газовую хроматографию на ароматические углеводороды (УВ).

Ранее было установлено [1-5], что на участке образования Ямальского кратера и других воронок газовых выбросов развиты пластовые льды, которые являются слабопроницаемой покрышкой, способствующей накоплению газа под большим давлением [3]. Поэтому одной из основных задач было выявление льдистых пород или мощных залежей пластового льда на участках образования МБП. Другой задачей было установление пустот, заполненных газом или водой в основании бугра и оценка напряжённо-деформированного состояния МБП. Эта задача решалась с помощью метода микросейсмического мониторинга с выделением стоячих волн [6]. Газовая хроматография использовалась для выявления ароматических углеводородов (C6-C8) и установления глубинной природы газа, поступающего по предполагаемому каналу дегазации в основании бугра.

В результате было установлено, что у нескольких МБП в основании выделяется либо вертикальная аномалия низкого удельного электрического сопротивления (УЭС), интерпретируемая как канал дегазации, либо локальная изометричная аномалия пониженного УЭС, интерпретируемая как промерзающий талик (рис. 1). В некоторых случаях эти электрические аномалии пространено совпадают с аномалиями Vp/Vs, выявленным по данным микросейсмического мониторинга. Однако не на всех участках развития МБП установлены аномалии УЭС от пластовых льдов. Это означает, что в таких случаях отсутствуют условия для накопления газа под большим давлением. По периметру МБП на участках интенсивного снегонакопления обнаружены признаки таликов в виде аномалий низкого сопротивления. Предполагается, что глубинный газ разгружается через такие талики.

Практически на всех МПБ и выявлены повышенные содержания ароматических углеводородов (бензола, толуола, ксилолов). Сравнение соотношений этих аренов в составе газоконденсата из месторождения, над которым развиваются МБП, показало полное соответствие составу УВ-газов из образцов почвенного воздуха на буграх.

Комплексирование геофизических методов и газовой хроматографии позволяет снизить неоднозначность интерпретации, однако подтверждение критериев выявления опасных бугров пучения требует заверки бурением.

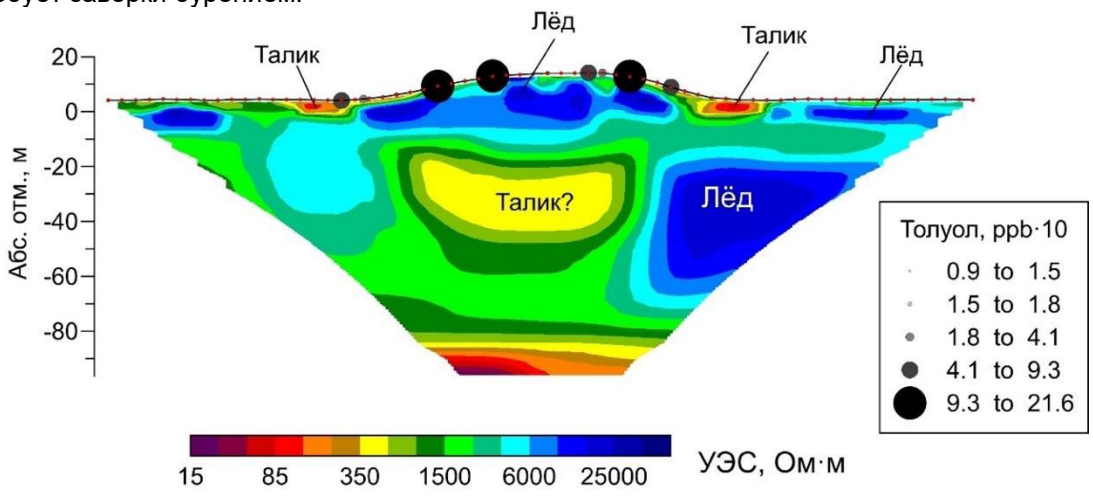


Рис. 1. Геоэлектрический разрез участка образования многолетнего бугра пучения с элементами интерпретации и содержание толуола в пробах почвенного воздуха.

Полевые исследования выполнены при поддержке ООО «Газпром добыча Надым», обработка и интерпретация данных – при поддержке проекта FWZZ-2022-0024 «Геоэлектрические и электромагнитные методы исследования верхней части земной коры: теория, модели, эксперимент» программы Федеральных научных исследований.

1. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 13—18.

2. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3(27). — С. 4—17.

3. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Мониторинг развития дуплетного объекта взрыва газа С22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования // Арктика: экология и экономика. – 2024. – Т. 14. – №. 3. – С. 318-331.

4. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. — 2016. — № 2. — С. 15—24.

5. Эпов М. И., Ельцов И. Н., Оленченко В. В. и др. Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук. — 2014. — Т. 59, № 5. — С. 14—23.

6. Колесников Ю. И., Федин К. В. Прямое определение резонансных свойств верхней части разреза по микросейсмам: натурный эксперимент //Технологии сейсморазведки. – 2017. – №. 3. – С. 5-21.

ПЛЫВУННОСТЬ ОТЛОЖЕНИЙ СЕЗОННО-ТАЛОГО СЛОЯ НА ЦЕНТРАЛЬНОМ ЯМАЛЕ

Опокина О.Л.[1,2], Слагода Е.А.[1], Королева Е.С.[3], Бабкина Е.А.[1], Данько М.М.[1], Иванов В.И.[1], Факащук Н.Ю.[1], Хомутов А.В.[1]

[1] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень

[2] Тюменский индустриальный университет, Тюмень

[3] Научный центр изучения Арктики, Салехард

opokinao@gmail.com

Плывунность отложений сезонно-талого слоя (СТС) часто осложняет буровые и строительные работы в криолитозоне. Фактический материал для изучения плывунных свойств отложений СТС на Центральном Ямале получен в 2021 г. на геокриологическом стационаре “Васькины Дачи“ при бурении термометрических скважин и работах на естественных обнажениях. Скважины пробурены на III и IV прибрежно-морских равнинах [2], а также в пределах термокарстовых котловинах, осложняющих поверхности этих равнин. Для определения естественного состояния и состава отложений была измерена их природная влажность весовым методом в полевых условиях и выполнен гранулометрический анализ на лазерном гранулометре Malvern Mastersizer 3000 в Лаборатории криогенных процессов ИКЗ ТюмНЦ СО РАН.

Выявлены следующие особенности строения, состава и свойств отложений СТС в районе исследований:

1. Мощность СТС изменяется от 0,4 до 1,6 м на равнинах и от 0,5 до 1,2 м в термокарстовых котловинах.

2. Песчаный или супесчаный состав с наличием глинистых частиц (<0,005 мм) в количестве 3-5% на равнинах и супесчаный состав с 5-8% содержанием глинистых частиц – в термокарстовых котловинах.

Наличие тонкодисперсной фракции в отложениях СТС обусловлено активным проявлением криогенного выветривания - частые переходы температур через ноль приводят к разрушению песчаных частиц.

2. Включения глинистых агрегатов, разрушение которых под воздействием ультразвука приводит к повышению количества глинистых частиц до 15%.

Агрегирование глинистых частиц также является результатом криогенного выветривания - при циклическом промерзании–протаивании, разрушении минералов, формируются новообразования в виде гидроокисей железа, которые “склеивают” между собой тонкодисперсные частицы [4].

3. Включения линз и прослоев разложенной органики.

Наличие органического вещества в отложениях повышает их влагоемкость, текучесть и снижает прочность. В результате активной жизнедеятельности микроорганизмов на частицах образуются биогенные пленки, которые снижают сцепление частиц, а выделяемые биогенные газы способствуют разуплотнению пород [3]. Наличие биогенных газов в верхней части разреза также связана с деятельностью метаногенов из оттаивающих мерзлых пород при увеличении глубины СТС [1].

4. Природная влажность отложений в основании СТС на момент бурения составляла 20-25%. Во всех скважинах при бурении в отложениях верхней части разреза проявились тиксотропные свойства.

5. Отмечена разная интенсивность плывунности в зависимости от рельефа.

Наиболее активно плывунный процесс проявился на склоне IV прибрежно-морской равнины. Из-за сильных дождей увеличился сток вод деятельного слоя, что привело к повышению напорного градиента и текучести отложений. Вокруг обсадной колонны скважины сформировалась суффозионная воронка.

Из-за плывунности отложений не удалось пройти до намеченных глубин скважину, заложенную в прибрежной части термокарстового озера на III прибрежно-морской равнине. Повышенная влажность отложений на глубинах, соответствующих уровню воды в озере и динамическое воздействие при бурении способствовали проявлению тиксотропности в талом слое.

В отложениях III прибрежно-морской равнины отмечено низкое проявление тиксотропии, что вероятно, связано как с малой мощностью СТС - 0,4 м, так и отсутствием дождей на период бурения.

В разрезах, изученных в естественных обнажениях термоцирка плывунные свойства отложений не проявлялись, т.к. в стенках цирка происходит естественная разгрузка вод деятельного слоя и динамическому воздействию (буровым вибрациям) отложения не подвергались.

Т.о. для отложений СТС на Центральном Ямале характерен песчано-супесчаный состав с содержание глинистых частиц до 8%, включением глинистых агрегатов и разложенной органики, природная влажность отложений составляет 20-25%. Вероятность активного проявления

тиксотропных процессов в СТС будет зависеть от рельефа местности и количества осадков в теплый период года. Плывунность отложений СТС является результатом активного проявления криогенного и биогенного выветривания.

Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

1. Бутаков В.И. Слагода Е.А., Заватский М.Д., Иванов В.И. Газовый состав и микроорганизмы в подземных льдах Российской Арктики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 9. С. 63–75.

2. Геоморфологическая карта: R-(40)-42 (о. Вайгач - п-ов Ямал). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Новая серия. М-б: 1:1000000. Составлена: ВНИИОкеанология, ЗапСибГеоНАЦ, ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1999.

3. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т. Влияние микроорганизмов на минеральный состав и свойства грунтов // Вестник Пермского университета. Геология. 2012. Вып. 3 (16). С. 47-54.

4. Рогов В.В. Основы криогенеза - Новосибирск: Гео, 2009. 201 с.

МОДУЛЬ ПОЛОСЫ СМЕРЗАНИЯ В МОДЕЛИ ДИНАМИКИ СУБАКВАЛЬНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ

В. Е. Остроумов[1], А. А. Васильев[2],
[1] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино
[2] Институт криосферы Земли Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень

В прибрежной полосе северных морей России рыхлые континентальные син - и эпигенетические многолетнемерзлые горные породы разрушаются за счет термоабразии, переотлагаются в прибойной зоне и постепенно оттаивают сверху в субаквальной среде. Их тепловое состояние формируется взаимодействием с морской водой на фоне смены граничных условий при постепенном увеличении глубины моря за счет тепловой осадки пород и донного переноса грунта. В эволюции криолитозоны от континентальной стадии к субаквальному состоянию важную роль играет этап смерзания пород с сезонным морским льдом на мелководье. Процессы теплообмена мерзлых пород с граничными средами в полосе смерзания сложны и изучены недостаточно.

В работе рассматривается возможность учета изменения теплового состояния пород зоны смерзания в трех моделях динамики эволюции субаквальной криолитозоны. Первая из предлагаемых моделей основана на описании динамики береговой линии как смены дискретных рангов скорости отступания береговой линии. Эта вероятностная модель описывает динамику отступания береговой линии при термоабразии в форме марковской цепи. Вторая модель представляет собой расчетную схему динамики оттаивания мерзлых пород в субаквальных условиях в зависимости от времени субаквальной жизни поверхности, которое контролируется историей скорости отступания берега. Тепловое состояние пород здесь оценивается с помощью приближенного решения задачи Стефана. Для работы третьей модели используются данные мониторинга температуры пород, а изменения теплового состояния оцениваются по решению уравнения теплопроводности с фиксированными эффективными значениями показателей теплофизических свойств пород.

Марковская цепь рангов скорости отступания береговой линии в первой модели вычисляется по данным берегового мониторинга, которые представляют собой последовательности отступания берегового обрыва на наблюдательных профилях. В непрерывном ряду скоростей отступания выделяются ранги, смена которых рассматривается как случайная последовательность независимых событий. В этой последовательности каждый текущий ранг скорости определяет вероятность перехода к одному из последующих рангов. По данным берегового мониторинга в модели вычисляется матрица переходных вероятностей, с помощью которой рассчитывается модельная последовательность. Результаты моделирования представляют собой ряд скоростей отступания берега. Учет вклада полосы смерзания в динамику береговой линии приводит к снижению частоты перехода к рангам высокой скорости и к увеличению частот перехода к низкоскоростным рангам. Это вызывает изменение переходных вероятностей и отражает снижение скоростей движения отступающего берега на участках с замедленной термоабразией на обширных полосах смерзания сезонного льда с морским дном.

После перехода к субаквальной стадии развития многолетнемерзлые породы постепенно оттаивают, причем глубина оттаивания, увеличиваясь во времени, контролируется граничными условиями. Распределение глубины оттаивания вдоль морской части профиля описывается как величина, зависимая от времени субаквальной жизни массива пород. Эта величина рассчитывается по данным ряда измеренных скоростей отступания берега. Распределение времени субаквальной жизни вдоль профиля имеет ступенчатую форму, причем участки с малыми градиентами изменения времени жизни отражают периоды быстрой термоабразии, а участки с малыми перепадами времени – периоды быстрого разрушения берега. Для характеристики глубины оттаивания пород в этой модели используется приближенное решение задачи Стефана. Вклад полосы смерзания в тепловое состояние мерзлых пород отражается в появлении пологого участка в начале подводного профиля, где оттаивание замедлено за счет охлаждающего влияния сезонного льда на породы.

Для описания температурного поля пород на этапе перехода от субаэральных условий к субаквальному режиму используется модель, основанная на решении уравнения теплопроводности с постоянными эффективными теплофизическими характеристиками грунтов. Измерения температуры пород в многолетнемерзлом массиве и на его границах позволяют рассматривать температурное поле на разном удалении от берега, соответствующих разным стадиям развития прибрежной полосы. Вклад полосы смерзания в тепловое состояние пород учитывается благодаря описанию охлаждающего влияния льда. Зона дополнительного охлаждения пород в зоне смерзания затормаживает нагревание и оттаивание пород в субаквальных условиях теплообмена.

Обсуждаемые модели основаны на использовании данных берегового мониторинга, которые включают ряды измеренных скоростей отступания термоабразионного склона и результаты

термометрических наблюдений. Модели построены на основе решения разных теплофизических задач, каждая из которых корректна при взаимно независимых ограничениях. Они по-разному учитывают влияние полосы смерзания на динамку оттаивания пород и на изменения теплового состояния мерзлого массива, а также на его морфологию. При всех различиях использованные модели на качественном уровне одинаково описывают роль полосы смерзания, которая сводится к дополнительному охлаждению пород в этой полосе за счет высокой теплопроводности сезонного льда и к временной стабилизации мерзлого грунтового массива и пород береговой полосы в целом.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0005).

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОГО ПРЕДЗИМНЕГО УВЛАЖНЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ВОССОЗДАНИЯ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ.

Сивцев М.А., Жирков А.Ф.
Институт Мерзлотоведения СО РАН, Якутск
sivtsevma@mpi.ysn.ru

Деградация многолетнемёрзлых пород приводит к изменению влагообмена в грунтах, развитию термокарстовых процессов и выделению парниковых газов, что усиливает глобальные климатические изменения [1]. Антропогенные нагрузки, такие как строительство и эксплуатация инфраструктуры, приводят к дополнительному нагреву и дестабилизации мерзлотных грунтов, создавая угрозу для инженерных сооружений [2]. Существующие методы защиты мерзлоты требуют оптимизации и адаптации к современным климатическим условиям [3].

В данной работе проведено исследование количественной оценки оптимального уровня предзимнего увлажнения, необходимого для формирования защитного слоя, препятствующего дальнейшей деградации мерзлоты. Использован комплексный подход, включающий полевые исследования, численное моделирование с применением COMSOL Multiphysics и анализ климатических сценариев. Разработанная модель позволяет прогнозировать устойчивость мерзлоты в зависимости от уровней увлажнения и температуры воздуха. Полученные результаты могут быть использованы для разработки инженерных решений по защите инфраструктуры и стабилизации мерзлотных грунтов в условиях изменения климата.

Выполнено численное моделирование процесса тепломассообмена в сезонноотаивающих многолетнемерзлых породах при инфильтрации предзимнего орошения и расчёта оптимального промораживаемого в зимний период объёма увлажнения на основе программы COMSOL Multiphysics. В качестве исходных данных были использованы климатические и геокриологические условия Лено-Амгинского междуречья. Результаты численного моделирования показывают, что влага, просочившаяся в почву в процессе орошения, быстро инфильтрируется в первые дни (с 1 по 3 день) (рис. 1а), затем её движение замедляется по мере достижения границы фазового перехода (на 56 день). После начала становления устойчивых среднесуточных отрицательных температур, деятельный слой сверху начинает промерзать, при этом глубина протаивания доходит до максимальных значений (рис. 1б). К 150-му дню расчета деятельный слой промерзает полностью (рис. 1в).

Расчёт оптимального промораживаемого в зимний период объёма увлажнения указывает на необходимость орошения слоем воды в 250 мм (250 л/м²), при условии полной инфильтрации, без потерь на испарение и эвапотранспирацию. Модель очень четко описывает процессы влаго- и теплопереноса, что важно для расчёта оптимального предзимнего влагонасыщения с целью воссоздания защитного слоя для восстановления и защиты нарушенных термокарстом территорий Центральной Якутии. Эти результаты способствуют разработке мер адаптации к меняющимся условиям окружающей среды при антропогенных нарушениях и изменениях климата.

Разработанная численная модель позволяет прогнозировать поведение мерзлотных грунтов при различных сценариях предзимнего увлажнения. Оптимизация уровня увлажнения может существенно замедлить процессы деградации мерзлоты, что имеет важное значение для проектирования и эксплуатации инженерных сооружений. Дальнейшие исследования будут направлены на валидацию модели с использованием дополнительных полевых данных и тестирование различных инженерных решений для стабилизации мерзлоты.

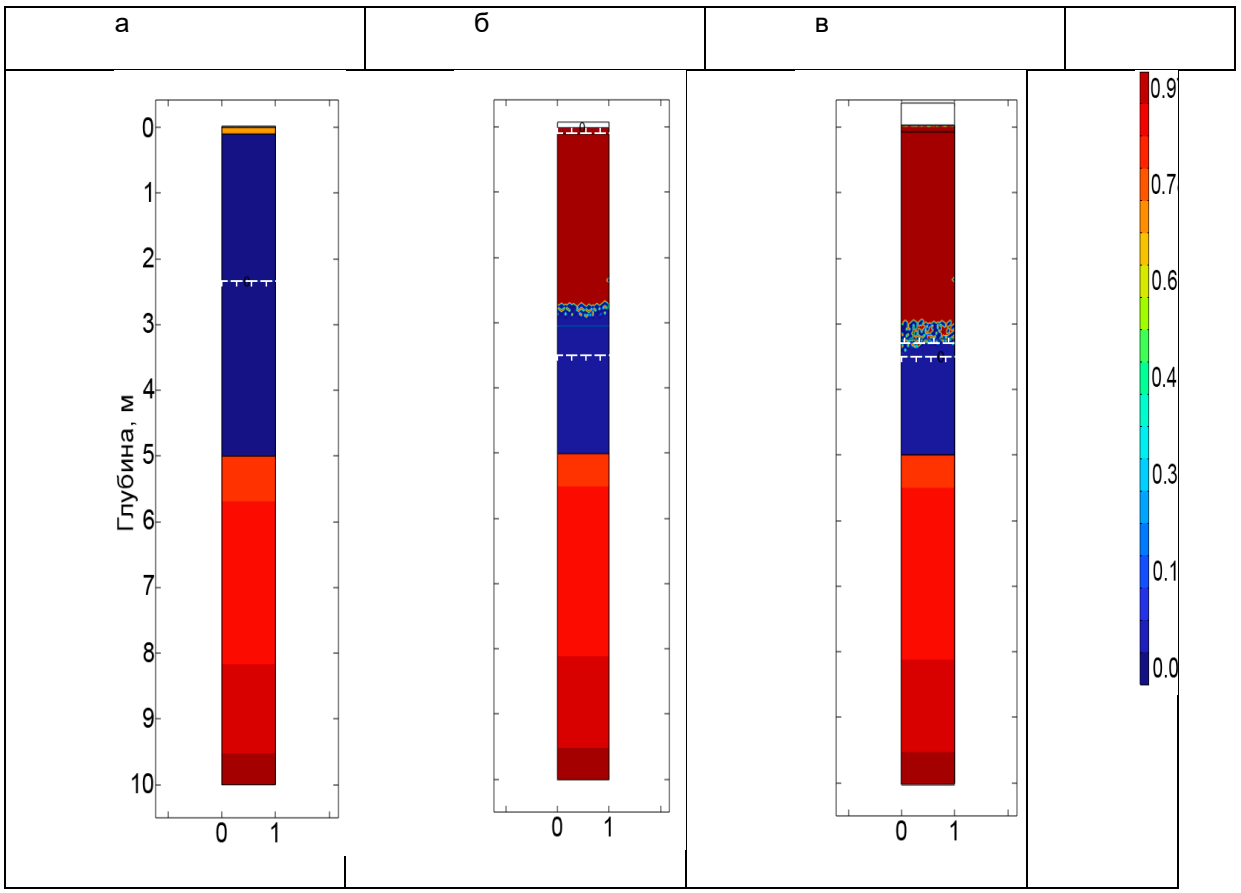


Рис. 1. Изменение заполнения пор влагой деятельного слоя: а – при нулевой начальной влажности (начало расчета, 1 сентября); б – на 30 день с начала расчетов; в – на 145 день с начала расчета (конец января)

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта П.И. Мельникова.

Литература

1. Schuur E. A. G., McGuire A. D., Grosse G., Harden J. W., Hayes D. J. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. Nature, 2015, 520, 171-179.

2. Klene A. E., Nelson F. E., Shiklomanov N. I. The n-factor as a tool in geocryological mapping: Seasonal thaw in natural and disturbed settings, Alaska. Physical Geography, 2013, 24, 286-302.

3. Fortier D., Allard M., Shur Y. Observation of rapid drainage system development by thermal erosion of ice wedges on Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago. Permafrost and Periglacial Processes, 2011, 18, 229-243.

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ($\delta^{18}O$ и δD) ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ ЯКУТИИ И СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Сивцев Д.Е.[1,2], Торговкин Н.В.[1]
[1] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
[2] Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
kotosogi@gmail.com

Полигонально-жильные льды (ПЖЛ) изучаются в качестве архивов зимних климатических условий в неоплейстоцене и голоцене в Арктике и Субарктике. Формирование ПЖЛ связано с заполнением морозобойных трещин снегом и талыми водами. Предполагается, что попавшие в трещины атмосферные осадки сохраняют полностью или частично свой изначальный изотопный состав, отражающий температурные условия формирования снежного покрова. В этом случае сингенетические ПЖЛ будут характеризоваться значениями стабильных изотопов кислорода и водорода, на основании которых можно реконструировать палеоклиматические условия холодных сезонов прошлых эпох.

За период изучения изотопного состава полигонально-жильных льдов был собран большой массив данных российскими и зарубежными исследователями. Имеющиеся данные разрознены и представлены в публикациях в различных форматах (значения в тексте, в таблицах, в графиках и в приложениях), что затрудняет сбор данных и их дальнейший анализ. Цель разработки базы данных изотопного состава полигонально-жильных льдов заключается в структуризации палеоклиматической информации из различных источников в едином формате, удобном для использования исследователями.

Климатические условия приморских низменностей и Центральной Якутии значительно отличаются, что также отражается в изотопном составе атмосферных осадков в зимний период. Данные различия прослеживаются и по изотопному составу полигонально-жильных льдов неоплейстоцена и голоцена. Выбор региона обусловлен широким распространением ПЖЛ и наличием большого массива данных по региону.

База данных значений изотопного состава ($\delta^{18}O$, δD, d-excess) ПЖЛ создана на основе опубликованных статей и книг за последние 40 лет. Структура первой версии базы данных изотопного состава полигонально-жильных льдов включает названия точек опробования, координаты точек отбора проб (если они есть в публикациях), осредненные значения изотопного состава ($\delta^{18}O$, δD, d-excess), дату отбора, возраст по датировкам (в т.ч. возраст вмещающих отложений), а также ссылки на публикации с представленными данными.

Основными ограничениями базы данных являются: 1) отсутствие координат точек отбора в опубликованных работах; 2) отсутствие исходных данных значений изотопного состава, в публикациях часто представлены только осредненные значения по одной или нескольким жилам; 3) значительные расхождения в значениях из-за различной методики отбора образцов; 4) неполное описание геоморфологического положения места отбора и криолитологического строения разрезов.

Обработка данных велась в среде R с использование библиотеки Leaflet для представления пространственных данных. Для По данным массива имеющихся данных разрабатывается интерактивная веб-карта (рис. 1) с возможностью выгрузки данных по отдельным точкам опробования ледяных жил.

В дальнейшем предполагается расширение базы данных как по территориальному охвату, так и по типам подземных льдов (инъекционные, пластовые, текстурные и др.), а также дополнительная проработка структуры данных для удобства использования и возможность добавления данных сторонними пользователями с предварительной модерацией.

Рис. 1. Интерфейс интерактивной карты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке научного проекта НИОКТР 122011800064-9 «Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене».

ДИНАМИКА И КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ КРИОГЕННЫХ ОПОЛЗНЕЙ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ (2007-2023 ГГ.)

Сизов О.С.[1], Миронова М.А.[2]
[1] *Институт проблем нефти и газа РАН, Москва*
[2] *Российский государственный университет нефти* и газа им. И.М. Губкина, Москва
kabanin@yandex.ru

Термоденудация находится в общем ряду ведущих процессов, формирующих современный рельеф криолитозоны Арктики. Одним из наиболее опасных проявлений термоденудации считается образование криогенных оползневых форм рельефа (КОФР) [Лейбман и др., 2023]. Однако результаты целенаправленных исследований не содержат определенных выводов о климатических предпосылках появления новых КОФР [Бабкина и др., 2019; Хомутов и др., 2024]. В этом отношении важное значение имеет точная оценка динамики появления криогенных оползней, позволяющая соотнести внутригодовую изменчивость метеопараметров с фактической активизацией термоденудации. При этом определенную сложность, как правило, составляет сбор ежегодных дистанционных данных с максимально высокой детализацией, обеспечивающих максимальную полноту выявления термоцирков на различных стадиях развития [Хомутов и др., 2024].

Целью данной работы является анализ динамики и выявление ведущих климатических условий образования КОФР в западной части полуострова Ямал с использованием в т.ч. дистанционных данных сверхвысокого разрешения (<1 м).

Район проведения исследования, площадью около 400 кв.км., расположен между мысом Бурунный и устьем р. Силъяха. Абсолютные отметки рельефа изменяются от 0 м на побережье Карского моря до 30 м на водоразделах (здесь и далее используется Балтийская система высот). Отличительной чертой мерзлых грунтов является широкое распространение крупных скоплений подземного залежеобразующего льда в верхних горизонтах. Кровля пластовых льдов по данным инженерно-геологических изысканий вскрывается на глубинах от 0,4 до 14,5 м, их мощность составляет от 0,2 до 15, 9 м, лед преимущественно прозрачный, белый или серовато-белый, без примесей и включений.

В качестве фактической основы работ аэрофото- и космические снимки со сверхвысоким (<1 м) пространственным разрешением (интервал мониторинга с 2007 по 2023 гг.). Дешифрирование осуществлялось визуальным методом на основе совокупности характерных геометрических, спектральных и текстурных признаков активных криогенных оползней, как наиболее достоверно выделяемых КОФР [Лейбман и др., 2023]. Для морфометрических расчетов (углы наклона, кривизна, экспозиция и др.) использовалась цифровая модель ArcticDEM (2 м), значения высот приведены к Балтийской системе. Для анализа климатических условий развития термоденудации использовались результаты срочных метеонаблюдений ближайшей станции Марресале с 1966 по 2021 гг. (данные получены с помощью АИСОРИ ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»).

Всего на территории исследований выявлено 367 КОФР с признаками активизации с 2007 по 2023 гг., общей площадью 119,3 га. Средняя площадь объекта составила 0,32 га, максимальная – 5,79 га, минимальная 0,01 га. Почти половину выборки составляют объекты, площадью до 0,15 га (48%), количество крупных оползней (более 1 га) не превышает 6%. Среднее значение периметра объектов составило 246 м, максимальное – 1588 м, минимальное – 35 м.

Высотное распределение довольно равномерное – 90% КОФР образовались в интервале высот от 7 до 25 м над у.м. Около половины КОФР (54% по площади и 40% по количеству) возникли на полого наклонной поверхности в узком интервале углов от 2,0 до 3,0°. В интервале от 1,5 до 3,5° выявлено 82% площади криогенного оползания.

Большая часть активных КОФР образовались в 2012 г. (61% от общей площади и 70% от общего объема), к 2007 и 2014 гг. отнесено 18 и 15% площади объектов соответственно. В остальные годы прирост площадей криогенного оползания не превышал 1,2% (в среднем 0,6% – от 1 до 6 объектов в год). Анализ архивных данных Landsat-7 показал, что оползневая активность происходила между 7 и 25 августа 2012 г.

Кардинальным отличием теплого сезона 2012 г. состояло в раннем наступлении весны, которое наглядно выразилось в том, что сумма положительных температур (индекс оттаивания) на Ямале более чем в 1,5 раза превысил средние значения за предыдущие почти 20 лет [Хомутов и др., 2024]. Можно предположить, что именно эффект постепенного накопления тепла и влаги играет ключевую роль в развитии КОФР. Формализация данного предположения возможна в виде климатического показателя опасности развития термоденудации (КПОРТ):

$$\text{КПОРТ} = \sum(T \times P)/10^5$$

где T – среднесуточная температура воздуха, P – суточная сумма осадков.

КПОРТ целесообразно рассчитывать от начала теплого периода (переход среднесуточной температуры воздуха через 0°); на примере западной части Ямала (метеостанция Марресале) расчеты выполнены с 1 июня по 31 августа.

Полученные результаты показывают, что в период с 2001 по 2021 гг. именно летом 2012 г. происходит последовательное увеличение КПОРТ до 1,73 к 31 августа на 136% превышает среднее значение (0,73) и на 40 и 60% превышает значение более теплых 2016 (1,24) и 2020 (1,07) гг. соответственно. Аномально раннее повышение КПОРТ заметно уже 20 июля, с переходом в критическую зону (>1) приблизительно 6 августа, с дальнейшим быстрым повышением вплоть до конца августа.

Климатическая аномалия 2012 г. имела общий для всей Арктики характер. С повышением температуры воздуха летом 2012 г., в частности, связывают аномальное увеличение глубины сезонно-талого слоя, высокие темпы вытаивания подземного льда, а также активный рост существующих и появление новых термоцирков в центральной части полуострова Ямала (район стационара «Васькины Дачи») [Хомутов и др., 2024].

Ситуацию 2012 г. наиболее логично сравнить с событиями конца лета 1989 г., когда в центральной части Ямала был зарегистрирован масштабный сход криогенных оползней (15-18 и 27-30 августа), в результате чего на несколько лет обширные участки поверхности оказались полностью оголены [Лейбман, 2005, Verdonen et al, 2020]. Оползни возникли в верхних, средних и нижних частях склонов различной крутизны и экспозиции [Баранов, 2005]. Расчет КПОРТ за 1966-1999 гг. показывает, что именно к концу августа 1989 г. значения достигают критического уровня (>1).

Таким образом, масштабная активизация криогенных оползней на полуострове Ямал происходит лишь в отдельные годы (1989, 2012) при уникальном или достаточно редком сочетании климатических и геоморфологических условий. В целом можно сделать вывод, что согласованный учет метеонаблюдений (температура воздуха, осадки), морфометрических параметров (углы наклона поверхности) и геологического строения (глубина и мощность пластовых залежей льда, литология верхней части разреза) делает возможным практическую реализацию системы оперативного мониторинга и краткосрочного прогнозирования развития криогенных оползневых процессов на локальном масштабном уровне.

Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факащук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. - 2019. - №4. - С. 99-109.

Баранов А.В. Эрозионные процессы при нефтегазодобыче в условиях Крайнего Севера // Российский химический журнал. - 2005. - т. XLIX, №4. - С. 120-124.

Лейбман М.О. Криогенные склоновые процессы и их геоэкологические последствия в условиях распространения пластовых льдов: дисс. д-р геол.-минерал. наук наук: 25.00.36. - Тюмень, 2005. - 262 с.

Лейбман М.О., Кизяков А.И., Нестерова Н.Б., Тарасевич И.И. Классификация криогенно-оползневых форм рельефа для целей картографирования и прогноза // Проблемы Арктики и Антарктики. - 2023. - №69(4). - С. 486-500.

Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А. Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. - 2024. - №70(2). - С. 222-237.

Verdonen M. et al. Periglacial vegetation dynamics in Arctic Russia: decadal analysis of tundra regeneration on landslides with time series satellite imagery // Environmental Research Letters, 2020. - Volume 15, Issue 10, doi: 10.1088/1748-9326/abb500

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ВОДЫ В ЗОНЕ ПРОМЕРЗАНИЯ С УЧЕТОМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШЛИРОВ ЛЬДА

Сидоров Д.С.[1,2], Григорьев Б.В.[2], Лейбман М.О.[1]
[1] *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия*
[2] *Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия*
dima160999@gmail.com

Большую часть территории Российской Федерации занимают районы с вечной мерзлотой и с глубоким промерзанием пород. Наиболее массовым криогенным явлением в этих районах, воздействующим на сооружения, особенно линейные, является морозное пучение. Морозное пучение – криогенный процесс, при котором увеличивается объем дисперсных пород при промерзании как вследствие увеличения объема воды при замерзании на 9%, так и вследствие накопления льда в дисперсной породе за счет миграции влаги.

Несмотря на массовость этого явления и тех негативных факторов, что оно несет, морозное пучение остается недостаточно изученным процессом, в первую очередь по причине многообразия влияющих факторов и условий формирования. Например, существующие математические модели морозного пучения практически не учитывают влияние вертикальных шлиров льда, образующихся в трещинах усыхания в обезвоживающихся вследствие миграции воды зонах. Однако известно, что такие шлиры увеличивают проводимость дисперсных пород, а также облегчают формирование горизонтальных линз льда, являющихся основной причиной морозного пучения (Arenson et al., 2008; Style et al., 2011; Основы…, 1996). Существуют модели, отдельно рассматривающие формирование горизонтальных линз льда в присутствии вертикальных шлиров, однако практически отсутствуют модели миграции незамерзшей воды в зоне промерзания в присутствии вертикальных шлиров. Цель предлагаемой работы – с помощью численного моделирования исследовать влияние вертикальных шлиров льда на проводимость зоны промерзания. В текущем исследовании не рассматриваются шлиры льда, образовавшиеся при морозобойном растрескивании.

Для многих дисперсных пород, особенно глинистых, в полевых условиях наблюдались вертикальные шлиры льда, которые образовывали на горизонтальном срезе полигональную сетку. Такая сетка наблюдалась и для образцов дисперсной породы в экспериментальных условиях при высоких отрицательных температурах (Xia, 2006). Многие теории связывают возникновение таких вертикальных шлиров льда с замерзанием воды в трещинах, образующихся в обезвоживающихся частях талой и промерзающей зон вследствие миграции из них незамерзшей воды. В текущей работе делается предположение, что сетка трещин формируется только в талой зоне и перестает формироваться в начале зоны промерзания, поскольку при переходе к отрицательной температуре дисперсная порода приобретает высокую прочность на разрыв, что препятствует формированию новых трещин усыхания. Таким образом, при моделировании образования трещин усыхания возможно не учитывать зону промерзания. Полигональная сетка вертикальных шлиров в зоне промерзания разбивает породу на отдельные ячейки, окруженные сверху и с боков льдом. Таким образом, решив задачу миграции для одной ячейки, можем решить её и для всей породы, если известен средний размер ячейки в зоне промерзания. Миграция незамерзшей воды происходит не только в самой ячейке, но и по пленкам воды вдоль вертикальных шлиров. Миграция также происходит из промерзающей ячейки к вертикальным шлирам вследствие присутствующих в ней градиентов напряжений. В первом приближении ячейку можно аппроксимировать цилиндром, что сводит задачу к двухмерной.

Для моделирования трещин усыхания использовалась численная FEM (Finite Element Model) модель. Преимущество FEM моделей заключается в возможности моделирования сложной геометрии с неоднородностями, а также такие модели хорошо справляются со связью термогидромеханических физических процессов, включенных в задачу. Для каждой ячейки задавались случайные параметры для моделирования неоднородности породы. Модель использовалась для генерации сетки трещин для различных значений потенциала влаги на верхней границе. Температура на границе остается высокой отрицательной, таким образом учитывается формирование только трещин усыхания. Измерялся средний размер ячеек моделируемого слоя для каждого значения потенциала влаги и строился график зависимости среднего размера ячеек от потенциала влаги. Затем решалась двухмерная задача для цилиндрической ячейки. Из решения находился коэффициент проводимости промерзающей породы с вертикальными шлирами льда. В дальнейшем рассчитывалась высота морозного пучения с помощью численной модели морозного пучения. Расчет проводился с учетом влияния вертикальных шлиров льда на коэффициент

проводимости и без учета, затем результаты сравнивались. Предварительные результаты показывают, что проводимость грунта при учете вертикальных шлиров значительно увеличивается.

Работа выполняется Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

Основы геокриологии. Ч. 2. Литогенетическая геокрилогия. Под ред. Э. Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1996. 399 С.

Arenson, L.U., Azmatch, T.F., Sego, D.C. A new hypothesis of ice lens formation in frost-susceptible soils. In Proceedings of the Ninth International Conference of Permafrost, Fairbanks, Alaska, 2008. P. 59–65.

Style R. W., Peppin S. S. L., Cocks A. C. F. Ice-lens formation and geometrical supercooling in soils and other colloidal materials. Physical Review E, 2011; 84(4) : 041402.

Xia D.D. Frost Heave Studies Using Digital Photographic Technique. M.S. Thesis. Edmonton, AB, Canada: University of Alberta, 2006. P. 165 – 169.

ВЛИЯНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ В ПРИРОДНЫХ ЛАНДШАФТАХ И НА ЗАСТРОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ НА ПРИМЕРЕ НОРИЛЬСКОГО РАЙОНА

Сидорова Т.А., Гребенец В.И., Стельмах Ю.Ю., Шалимов Д.А., Николаева Е.С.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва

Увеличение частоты снегопадов и повышение зимних температур в Арктическом регионе определяют особую роль твердых осадков в формировании температурно-влажностного режима деятельного слоя. Нарастающие климатические тенденции подчеркивают необходимость осуществления снегомерных исследований, как в естественных условиях, так и на урбанизированных территориях, где специфика перераспределения снега находится под влиянием особенностей городской среды.

Целью наблюдения стало проведение снегомерной съемки в Норильском промышленном районе (НПР) в природных условиях и в центральной части города Норильск.

Район исследования относится к одному их самых снежных регионов России (Атлас…, 1997). На накопление и перераспределения снега здесь оказывают штормовые арктические ветра. Расположение района в периферийной части сибирского антициклона также способствует формированию здесь весьма неустойчивой погоды в зимний период. При механической ветровой нагрузке в верхней части снежной толщи формируется мощный снежный наст.

В ходе изучения пространственного распределения снежной толщи в январе-феврале 2025 было установлено, что толщина снежного покрова варьировала от 5-7 см на открытых возвышенностях, лишенных развитой растительности, до 150-170 см в локальных понижениях, ложбинах. Значительные вариации наблюдались и в плотности: верхние слои были представлены мощным, плотным снежным настом толщиной до 10 см, под ним располагался разрыхленный слой округленных снежных кристаллов, нижнюю часть толщи слагал слой бокаловидной глубинной изморози мощностью до 20 см. Температурный градиент в толще колебался от 1,8 до 3,5 ^{0}С/10 см, который возникал в связи с изолирующим действием снежного покрова на поверхность земли. Наличие большого температурного градиента приводит к перекристаллизации снега, в результате которой в нижних слоях толщи образуется глубинная изморозь (Фирц и др., 2012). Повторные наблюдения были проведены в середине марта 2025 года. Отметим, что исследования проводились после значительных снегопадов. Количество снега увеличилось примерно на 20%. К моменту повторного обследования в верхней части снежной толщи снежный наст не был сформирован. При этом был отмечен значительный рост толщины слоя глубинной изморози (до 50 см).

Также были проведено изучение особенностей антропогенного снегонакопления на территории городов Норильск и Дудинка. Городская очистка снега изменяет естественное снегонакопление и температурный режим грунтов, что критично для устойчивости зданий в НПР из-за распространения вечномерзлых пород. Крупные снегоотвалы создают локальные зоны растепления, формируя «грушеобразный» ореол оттаивания, что снижает несущую способность свайных фундаментов. В ходе работ особое внимание уделялось локализации и пространственным характеристикам крупных снегоотвалов, а полученные данные были сопоставлены с результатами наших предыдущих исследований в этом районе в январе-феврале 2024 г и исследований 2019 г (Гребенец, Толманов., 2021).

Обследование распределения снегоотложений вокруг 12 различных объектов в г. Дудинка показали, что примерно у половины зданий основные скопления снега и занос продухов подполий наблюдаются с теневой (по отношению к ветрам юго-восточного направления в зимний период) стороны.

Значительное внимание в ходе работ уделялось изучению особенностей снегоочистки в г. Норильск, в ходе которой во внутриквартальных зонах формируются значительные локальные снежные массы – снегоотвалы.

Значительную роль в формировании основных свойств вечномерзлых грунтов играет модифицированный режим снежных отложений, который отличается от естественных природных условий. Этот режим включает механизированное перераспределение снега, организацию специальных участков с увеличенным снегонакоплением в области ветровой тени от объектов застройки, а также физико-химические воздействия, вызванные накоплением загрязняющих веществ и пыли, что в свою очередь приводит к изменению альбедо снежного покрова. Усиление процессов снегонакопления может способствовать значительному подтоплению различных элементов городской структуры, повышению уровня переобводнения холодных проветриваемых подполий и усиливающему морозному разрушению (криогенному выветриванию) материалов конструкций.

Город Норильск отличается весьма разнообразной, разновременной застройкой. В ходе проведенных исследований было выявлено, что разномасштабность и различия в конфигурации снегоотвалов при механизированной снегоуборке варьируют от 0,2-0,4 м до 6,6-7 м, а вариации в высоте снегоотвалов на застроенных территориях кратно превышают диапазон изменения мощности снега в природных условиях. Кроме того, практически 75% снегоотвалов концентрируются на одних и тех же местах от года к году. В период снеготаяния это приводит к переобводнению коллекторов и заниженных холодных проветриваемых подполий, а также к повышенному увлажнению строительных конструкций (балок ростверков, оголовков фундаментов) при примыкании снежной массы непосредственно к конструкции. Появляется высокая вероятность активизации опасных процессов при близком залегании к поверхности льда и льдистых отложений верхней части мерзлоты на участках расположения крупных снегоотвалов. Для минимизации негативного теплового влияния на вечномерзлые основания необходимое удаление снегоотвалов от объектов должно быть не меньше ширины отвала.

Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. Т. 1. / Ред. В. М. Котляков. М.: изд. РАН, 1997. 392 с.

Гребенец В. И., Толманов В. А. Влияние специфического режима снежных отложений на вечномёрзлые основания в городах криолитозоны (на примере Норильского региона) //Лёд и снег. – 2021. – Т. 61. – №. 3. – С. 457-470.

Фирц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И., Этхеви П., Грин И., МакКланг Д.М., Нишимура К., Сатьявали П.К., Сократов С.А. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова). Русское издание // МГИ. 2012. № 2. 80 с.

ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИСХОЖДЕНИЯ КРИОГЕННЫХ И БИОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Слагода Е. А.
Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень
easlagoda@ikz.ru

Исследования разрезов четвертичных отложений в криогенной и палеокриогенной областях требуют согласования постулатов и методов интерпретации специалистами из разных областей наук о Земле. В разрезах могут присутствовать элементы строения со сходной морфологией и внутренним строением, связанные: с экзогенными процессами - седиментационными, диагенетическими, криогенными (промерзанием и протаиванием), с биогенными - формированием почв, захоронением растительности и животных; с антропогенной деятельностью. Иногда, к псевдоморфозам и грунтовым жилам без достаточных оснований, относят клиновидные тела, связанные с заполнением эрозионных врезов или остатки ям, землянок. Геометрические формы полигонов и структурных грунтов, бугры пучения можно принять за искусственные сооружения, могильники; криотурбации - за следы землероев или воздействие сейсмики, трещиноватость пород вследствие криогенного выветривания на поверхности - за последствия неотектоничских процессов. Следы экзогенных процессов, биоты и человека чаще всего совмещены в разрезах отложений и рельефе, что осложняет идентификацию (состав, свойства, взаимоотношения компонентов) и диагностику (связь с процессами, условиями, действующими факторами, событиями).

Н. Н. Романовский типизировал признаки ПЖС и их изменчивость в связи с фациальными обстановками, но не рассматривал их отличия от сходных структур иного происхождения. Псевдоморфозы и изначально-грунтовые жилы могут иметь сходные признаки - размеры, форму, соотношения с вмещающими отложениями, внутреннее строение и соответствие полигональной сети, как в зависимости от условий формирования, так и после протаивании ПЖЛ, т.к. от размыва сохраняются, в основном, средние и нижние части жил в менее льдистой толще.

Псевдоморфозы имеют особенности: унаследованные от ПЖЛ, образованные при вытаивании льда и заполнении полости и наложенные в ходе последующего промерзания. Оттаявшие перекрывающие и вмещающие отложения постепенно оползают, осыпаются в полость протаивания, распределение материала зависит от их состава, связности, размеров и формы, скорости заполнения и форм полостей. Вертикальная слоистость псевдоморфоз может формироваться за счет: 1 - слоистых вмещающих отложений, их послойного оттаивания с поверхности и на стенках жилы, постепенного увеличения глубины и ширины полости протаивания с одновременным заполнением, оплыванием и уплотнением грунтов разного состава; 2 - с задержкой заполнения полости протаивания при сохранении связанного состояния оттаявших отложений (например, торфа); 3 - протаивания ледогрунтовых жил. Псевдоморфозы могут не иметь вертикальной слоистости при заполнении полости однородными отложениями. Неясно, следует ли включать в границы псевдоморфоз блоки оползания, осадки линз от луж над плечиками и термоэрозионных каналов, ведь к жилам заполнения относят отложения, облекающие понижения поверхности после полного вытаивания льдов. Верхняя граница может быть выделена однозначно по эрозионному контакту или неоднозначно - при наложении на жилы почв, криогенных инволюций, проникновении в них слоев, ксенолитов перекрывающих отложений.

Изначально-грунтовые жилы формируются в деятельном слое при вытаивании сезонных элементарных жилок. На открытой поверхности морозобойные трещины часто наследуют трещины усыхания, их полости могут заполняться песком, оплывшим грунтом со стенок, летом водой и осенью снегом, причем вмещающие талые слои обычно отогнуты вниз вдоль жил, а этот признак характерен для эпигенетических ПЖЛ и псевдоморфоз по ним. Выделяют грунтовые жилы по сложению заполнителя - «отгибанию» слоев, «заполнению» разным материалом; по сомкнутым трещинам, сколам - не заполненные иным материалом. Грунтовые жилы могут иметь субвертикальную полосчатость при наличии слоистости в отложениях деятельного слоя или ежегодной изменчивости заполнителя - песка, снега, органики. Эти жилы в зонах аккумуляции осадков и морозобойного растрескивания, могут предопределять место формирования ПЖЛ, слагать их «хвосты», а затем нижние части псевдоморфоз.

К особенностям изначально-грунтовых жил Н.Н. Романовский, Н.С.Данилова, В.В. Баулин относили потёки гумуса, растекание и размазывание их контура над мерзлотой; сохранность внутри жил слоистости вмещающих отложений. Сочетание в жилах вертикальной слоистости вместе со слоистостью вмещающей толщи иногда является следствием вскрытия по их простиранию, неровностью их боковых стенок и присутствием ксенолитов. Гумусовые потеки, «размазывание» контура нижней границы в клиньях также не являются однозначным признаком изначально-грунтовых

жил. Так, клинья белого подзола, погребенные под песчаным надувом с современными кедрами и их корнями, не имеют связи с грунтовыми жилами. Это остатки полностью разложенных крупных корней, перекрытых пирогоризонтом почвы. Внизу контуры клина размазаны, пески имеют вертикальную коричневую штриховку за счет вмывания гумуса сверху, сходную с вертикальной полосчатостью жил. Корни с корой и игольчатыми корешками, подобные современным, после разложения оставили темно-коричневые ожелезненные линзы на краях клиньев подзола, которые можно спутать с посткриогенными текстурами вмещающих отложений. Ожелезненные ветвистые скопления (остатки боковых корней), разрывают, отгибают слои песков вверх и вниз, поэтому похожи на грунтовые жилки отгибания. Главное отличие остатков корней от жил - их контуры в плане. СКроме того, с грунтовыми жилками можно спутать неполнлостью вскрытые фрагменты криогенных инволюций - выбросы разжиженного грунта.

Перечисленные особенности грунтовых жил и биогенных образований широко распространены в разрезах Западной Сибири. Они позволяют выделять криотурбации в современном и реликтовом деятельном слое; чаши протаивания с криогенными инволюциями в результате снижения кровли мерзлоты и промерзания таликов, отражающих изменения природных условий и процессов. Так, в разрезе карьера в районе г. Пангоды вскрыто два яруса псевдоморфоз с разным заполнителем - суглинки и пески. Они разделены погребенной чашей протаивания в виде двояковыпуклой линзы (более 50 м по латерали) заполненной пачками слоистых песков с грунтовыми жилками и криогенными инволюциями.

Комплексные полевые работы на разрезах отложений желательно проводить междисциплинарным коллективом, т.к. выделение разных объектов предполагает согласование их связей в разрезах, рельефе и ландшафтах. Корректировка результатов исследований и интеграция данных может привести к более достоверным и детальным палеореконструкциям развития природной среды, тенденций экзогенных процессов и изменений климата.

Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

МОНИТОРИНГ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АНАДЫРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Трегубов О. Д., Уяганский К. К.
Северо-восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан
АНО "Чукотский арктический научный центр", Анадырь
tregubov2@yandex.ru

Системные наблюдения деятельного слоя актуальны при любых трендах изменений климата в криолитозоне. Являясь общепризнанным инструментом анализа реакции кровли многолетней мерзлоты на потепление климата, мониторинг деятельного слоя позволяет изучать закономерности формирования и функционирования мерзлотных ландшафтов. Обязательными условиями мониторинга является непрерывность наблюдений, единство инструментария и методологических подходов. При этом в каждом регионе имеются свои особенности геокриологии, почвообразования и динамики климата, позволяющие дополнять перечень наблюдаемых параметров и процессов в деятельном слое криолитозоны. В Анадырской низменности Чукотки это мелкий тип сезонного протаивания при относительно "теплой" и сплошной, на большей части территории многолетней мерзлоте, повсеместное распространение льдистого горизонта переходного слоя, активная динамика надмерзлотных вод в сезонно-талом слое и субаэральных таликах. Поэтому столь важен обмен опытом и обсуждение состава работ, перечня наблюдаемых параметров, текущих результатов, проблем и перспектив мониторинга.

Первые наблюдения деятельно слоя и криогенных процессов на Чукотке были начаты в 1935 году силами Анадырской мерзлотной станции. Наблюдения деятельного слоя тогда не имели системного характера и сводились к разовым определениям глубины сезонного протаивания, измерениям температуры почв и грунтов в мелких скважинах. Во второй половине 20 века акценты наблюдений деятельного слоя в Анадырской низменностями определялись задачами организации сенокосных угодий в термокарстовых котловинах. Исследования деятельного слоя ограничивались сроками осушения озер и аэрации почв тундровых увалов, а после временем эксплуатации и деградации лугов, вследствие промерзания склонов и озерных таликов. Системные долгосрочные наблюдения сезонного протаивания и криогенных процессов были начаты в 1994 году в рамках международной программы CALM[1], с организации мониторинга сезонного протаивания, на площадке "мыс Рогожный" (R9)[2]. В 1996 г. наблюдения организованы на площадке "гора Дионисия" (R11), а спустя 14 лет, в 2010 г. на площадке "река Круглая". Площадки размером 100х100 м представляют доминирующие или распространенные в низменности ландшафтные фации или их комбинации: невысокие тундровые увалы, озерно-болотные котловины, подножья сопок в долинах рек и ручьев. В настоящее время площадки, оставаясь в международной научной наблюдательной сети, оформляются в статусе участков сети регионального фонового мерзлотного мониторинга.

Практически сразу с начала мониторинга на площадках и в их окрестностях были начаты наблюдения проявлений криогенных процессов: сезонного пучения, солифлюкции, термоабразии, термокарста и термоэрозии, склонового наледеобразования. Наблюдения большей частью производились визуально, иногда с применением элементарных измерений. Позже перечень наблюдаемых параметров и площадок (профилей, участков) расширился. Ниже приведена краткая информация по видам работ и наблюдаемых криогенных процессов.

Сезонное протаивание и температура почв. Проводится непрерывно по настоящее время на 3 площадках. Глубина протаивания определяется по сети 10х10 м металлическим щупом, температура почв измеряется с помощью логгеров Hobo Onset U23-003 круглогодично на глубинах 15-20 и 30-40 см. Результаты наблюдений регулярно обобщаются в периодических изданиях. Основные достижения связаны с анализом межгодовых колебаний мощности сезонно-талого слоя, исследований связей глубины протаивания и температуры почв с динамикой климатических показателей. Важным результатом наблюдений является оценка влияния динамики сезонного протаивания на термоабразию, термокарст и обводненность термокарстовых озер. С 2018 г. отмечено усиление контрастности межгодовых колебаний на фоне уменьшения глубины протаивания и среднегодовой температуры воздуха.

Термоабразия и термокарст. Термоабразия берегов залива Онемен в эстуарии Анадырь отслеживается с 2003 года. Наблюдается образование оврагов и термоцирков при вытаивании

[1]Circumpolar Active Layer Monitoring: Long-Term Observations of the Climate-Active Layer-Permafrost System

[2] Индекс площадке в базе данных www2.gwu.edu/~calm/data/north.htm

погребенных повторно-жильных и пластовых подземных льдов. За время наблюдений зафиксировано 4 фазы активности и затухания термоабразии. Термокарст наблюдается на площадке "река Круглая". Контролируемые объекты берега термокарстовых озер и "озеро блюдце" размером 10 м в поперечнике. Результаты наблюдений опубликованы. С 2022 года на площадке замечена неравномерная осадка поверхности, сопровождаемая образованием термокарстовых просадок, обводнением и изменением структуры растительного покрова.

Наледеобразование. Динамика образования склоновых наледей контролируется нерегулярными наблюдениями на площадках R11, R45 и в окрестностях Анадыря. Результаты наблюдений не обобщены и не опубликованы. Отмечается, что усиление формирования наледей находится в противофазе с межгодовыми колебаниями глубины сезонного протаивания. Имеются предпосылки для разделения склоновых наледей на два сливающихся в пространстве и по времени типа: наледи деятельного слоя и наледи субаэральных таликов ложбин стока.

Образование и сток надмерзлотных вод. Мониторинг начат в 2018 году в окрестностях Анадыря в створе руч. Промыслового с помощью логгера-уровнемера Hobo Onset U20L-01. В летнее время данные измерений корректируются путем измерения расходов в створе с помощью вертушки "ПОТОК-мкр". В 2020 г. в створе дополнительно установлен логгер-кондуктомер U24-001. Измерения уровня и минерализации вод проводятся в специальных перфорированных трубах круглогодично с интервалом 6 часов. Материалы 6 (4) летних измерений не обработаны и не опубликованы.

Образование сезонных подземных льдов. Мониторинг начат в 2018 году по 2 профилям, разбитым в окрестностях Анадыря. На 10 пикетах с помощью трубы диаметром 40 мм ежегодно весной отбираются пробы керна мерзлых почв до глубины 45-55 см. Льдистость почв определяется термостатно-весовым методом. Параллельно наблюдениям ведется разработка методики мониторинга сезонной льдистости с использованием метода вертикального электрического зондирования. Материалы 6 летних измерений не обработаны и не опубликованы.

В числе проблем мониторинга финансовое и кадровое обеспечение. Прежде всего, это касается транспортной доступности объектов и поддержание синхронности наблюдений. Немаловажными являются вопросы обслуживания и своевременной замены средств измерений. Перспективы развития мониторинга связаны с изучением и контролем динамики микро- и нанорельефа поверхности площадок, которая может быть обусловлена как осадкой поверхности, так площадным ее подъемом за счет приращения льдистого горизонта. Здесь проблемы касаются разработки единых методических подходов, определения требований к технологии и периодичности измерений. В 2006-2010 гг. на площадках в Анадырской низменности была выполнена разовая геодезическая съемка по сети 20х20 м. Наблюдения рельефа планируется выполнить повторно в 2026-2027 гг. Данный подход требует корректировки: он дает лишь общие представления об относительном изменении рельефа поверхности, достаточно трудоемкий по времени и числу операторов.

МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И ОБРАЗОВАНИЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКОВ ПРИ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

Хомутов А.В., Лейбман М.О., Слагода Е.А.
Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия
artcryo@ya.ru

Природно-антропогенные взаимодействия включают в себя то, что происходит между природной средой и человеком в результате его деятельности при освоении территорий, месторождений полезных ископаемых, строительстве зданий и сооружений и их дальнейшей эксплуатации, а также традиционного хозяйствования.

Для наилучшего понимания возможных рисков при таких взаимодействиях в криолитозоне необходимо иметь полноценную информацию о процессах, происходящих в природной среде независимо от человеческой деятельности, например при колебаниях климата, в качестве репера. Получить такую информацию возможно путем мониторинга, моделирования и прогноза на основе полученных результатов развития криогенных процессов и образований.

Известна и широко обсуждается активизация криогенных процессов, связанных с вытаиванием разных типов подземных льдов при трендах повышения температуры воздуха и пород и при ненаправленных, но резких колебаниях количества атмосферных осадков. Разные научные коллективы применяют доступный им по опыту исполнителей и объемам финансирования комплекс методов исследования.

Анализ методик показывает следующее:

- Применение разных видов дистанционных исследований особенно результативно в тундровой зоне. Они дают наилучшие результаты в идентификации криогенных форм рельефа в развитии, в том числе, позволяют ретроспективно установить погребенные или разрушенные формы рельефа недалекого прошлого.
- Геохимические и изотопные методы необходимы для достижения цели в комплексе с традиционными геокриологическими на севере Западной Сибири, где развиты засоленные, с углеводородами толщи, разные типы подземных льдов и др.
- Необходимо уточнение генезиса форм криогенного рельефа, трендов изменения геокриологических условий и преобразования ландшафтов в связи с современными колебаниями климата. Морфологически сходные формы рельефа разного масштаба могут быть результатом диаметрально противоположно направленных процессов и их сочетаний, локализованных на однотипных объектах: полигональных торфяниках, термоцирках, водоразделах и др.
- Актуальна разработка комплекса признаков малоизученных следов вытаивания пластовых и жильных льдов, ядер бугров пучения в оттаявших и многолетнемерзлых породах.
- Полевые методы обеспечивают исследования реальными фактами для оценки точности дистанционных и аналитических методов, необходимых для прогноза криогенных процессов.

Работа выполняется Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

3. ИНЖЕНЕРНОЕ МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ. УСТОЙЧИВОСТЬ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ОСНОВАНИЙ ТЕХНОГЕННЫХ КУРУМОВ

Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Плотников Н.А.
Институт мерзлотоведения им.П.И.Мельникова СО РАН, Якутск
afgalkin@mail.ru

Целью работы являлось установление основных закономерностей взаимосвязи температурного режима основания техногенного курума (скального отвала) с высотой пионерной насыпи для создания барьерного целика при ведении открытых горных работ в зоне островной мерзлоты. Проведены комплексные теоретические исследования, на основании которых определены основные закономерности формирования теплового режима мерзлых и оттаивающих оснований техногенных курумов. В частности, установлено, что существует следующая закономерность: «Степень снижения высоты пионерной насыпи техногенного курума прямо пропорциональна степени понижения средней температуры пород деятельного слоя основания». То есть, при снижении средней температуры пород деятельного слоя в 2 раза (например, с -4,0 до -8,0 ^{0}C) необходимая высота пионерной насыпи для создания барьерного целика также уменьшится в 2 раза. Исследовано влияние твердых и жидких атмосферных осадков на формирование теплового режима основания возведенного техногенного курума. Подтверждена эффективность снежной мелиорации при подготовке грунтового основания для пионерной насыпи скального отвала. Разработаны методика, алгоритм и программы для ПЭВМ по выбору оптимальных режимов возведения техногенных курумов в зоне островной мерзлоты. Подготовлены практические рекомендации по технологии возведения техногенных курумов (скальных отвалов) для создания барьерных целиков, исключающих растепление мерзлых пород оснований, при ведении вскрышных работ на месторождениях зоны островной мерзлоты. На рисунке приведены отдельные результаты вариантных расчетов в графической форме. Розовым цветом выделена область оптимальных значений температуры основания техногенного курума для возведения пионерной насыпи.

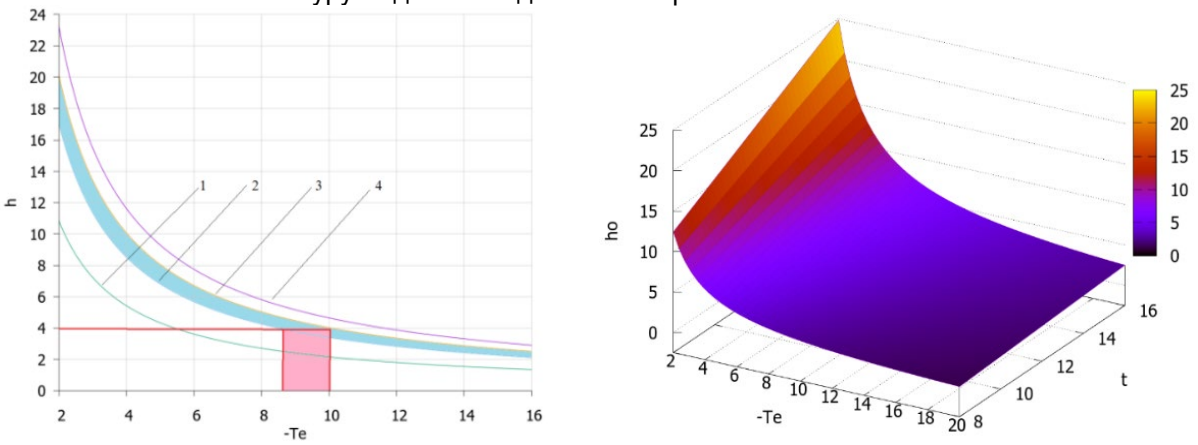


Рис. Изменение необходимой высоты техногенного курума для создания барьерного целика в зависимости от средней температуры пород деятельного слоя в конце периода проморозки при разной температуре воздуха в теплый период года: 1 – t = +7,0^{0}C; 2 – t = +10,8^{0}C; 3 – t = +12,8^{0}C; 4 – t = +15,0^{0}C

ПРОБЛЕМА ПРОГНОЗА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ

Горелик Я.Б., Земеров И.В.
Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН
gorelik@ikz.ru

Технология проектирования сооружений на многолетнемерзлых грунтах, базируется на прогнозном теплотехническом расчете состояния мерзлых грунтов в течение срока эксплуатации сооружений (порядка 30-50 лет). Процедура учета изменения климата в таких расчетах должна быть соответствующим образом обоснована и рекомендации по поправкам к ней должны содержаться в существующих нормативных документах (СП 25.13330). Сегодня в некоторых документах можно прочесть, что прогноз температуры грунтов (необходимой длительности) может быть получен на основании мониторинговых данных или построенных на их основе карт. Обоснование такого утверждения на сегодняшний день отсутствует. Мониторинг дает эмпирические сведения по грунтам только за прошедший период наблюдений (вплоть до момента последнего снятия показаний) и не содержит никакой информации о будущем поведении объекта наблюдения. Эти данные можно экстраполировать на прогнозируемый отрезок времени, однако такая экстраполяция будет иметь силу прогноза только при условии достаточного обоснования гипотезы, что существующий в период наблюдений климатический тренд сохранится в течение прогнозируемого периода. Пока такое доказательство в публикациях отсутствует. Здесь стоит напомнить, что за прошедшие примерно 70 лет (с 1940 по 2010) направление климатического тренда менялось по крайней мере трижды [*Комаров и др., 2024*].

Вместе с тем, проблема прогноза состояния грунтов при изменении климата для проектирования сооружений имеет два важных проблемных пункта, которые в настоящее время не разрешены в должной мере:

а) отсутствует способ достоверного прогноза изменения главного климатического параметра - температуры воздуха на срок эксплуатации сооружений (с учетом региональных особенностей осваиваемой территории). Существующие теории, базирующиеся на балансовых соотношениях для парниковых газов и учитывающие циркуляционные процессы в океане и атмосфере, дают характеристики усредненных температур по территориям глобального масштаба и, кроме того, представляют результаты в виде нескольких вероятных сценариев (от наихудшего до наиболее благоприятного). В настоящий момент представляется весьма сложной задачей применить эти результаты для задач проектирования (учитывая также, что проектировщик не обладает компетенцией в выборе климатического сценария);

б) существует значительный недостаток знаний о скорости изменения климатических параметров, следующих за изменением климата и в высокой степени определяющих региональные особенности теплообмена залегающих грунтов с атмосферой (сезонное осадконакопление, видовой состав растительности, ветер и т.д.).

Отсутствие в настоящее время удовлетворительного решения по указанным выше пунктам не позволяет достаточно быстро создать обоснованный в необходимой мере метод прогноза (отметим, что проектирование и соответствующее строительство происходит и в настоящее время и его невозможно остановить, но как с этим разбираться – это вопрос, который тоже должен быть рассмотрен). Тем не менее, в последнее время появляются публикации, имеющие в своей основе содержательные идеи, которые дают возможность обойти обозначенные выше трудности (например, [*Хрусталев и др., 2011*]). В настоящем докладе предлагается к рассмотрению дальнейшее развитие некоторых высказанных ранее авторских идей [*Горелик*, *Земеров*, 2022; *Горелик*, *Земеров*, 2023] по преодолению существующих трудностей прогноза.

1. Комаров И.А., Мироненко М.В., Никитин К.А., Кияшко Н.В. Методик прогноза температурного и водно-ионного режима засоленных мерзлых пород полуострова Ямал с учетом глобального изменения климата. Direct-MEDIA, М., 2024, 157 с.

2. Хрусталев Л.Н., Пармузин С.Ю., Емельянова Л.В. Надежность Северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата. Университетская книга, М., 2011, 260 с.

3. Горелик Я.Б., Земеров И.В. Полуэмпирический метод прогноза термического отклика многолетнемерзлых грунтов на потепление климата // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России “Мониторинг криолитозоны”, М., МГУ, 14 – 17июня, 2022, стр. 529 – 537.

4. В.П. Мельников, Н.С. Молокитина, Я.Б. Горелик, И.В. Земеров, А.Х. Хабитов, М.Н. Железняк, Р.В. Чжан, А.Д. Набережный, П.С. Заболотник, А.А. Чжан, А.А. Башкова, А.Н. Шеин. Обеспечение надежности инженерных сооружений в Арктике при современных климатических изменениях / Сборник докладов конференции «Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата», Якутск, 2023, с. 126-129.

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СТОИМОСТИ ОСНОВНЫХ ФОНДОВ В КОНТЕКСТЕ ЗАДАЧ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РИСКОВ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

Бадина С.В.
МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
НИЛ геоэкологии Севера, Москва
badina@geogr.msu.ru

Множество современных исследований, посвященных прогнозированию экономических последствий таяния многолетней мерзлоты вследствие климатических изменений на макроуровне (региональном и субрегиональном), сталкиваются с задачей оценки стоимости основных фондов (например, [Мельников и др., 2021; Streletskiy et al., 2019]). Для территории России при этом существует существенное ограничение, связанное с отсутствием доступных данных – данные о стоимости и отраслевой структуре основных фондов на уровне муниципальных образований и поселений отсутствуют в государственном статистическом учете. В связи с этим возникает задача научного поиска в сфере разработки подходов к оценке недостающих параметров.

В контексте оценки рисков оттаивания многолетней мерзлоты на долгосрочную перспективу (до середины XXI века и далее) необходимо представление о стоимости основных фондов (в первую очередь – их недвижимой части, то есть зданий и сооружений) по следующим видам (уровень муниципальных образований): 1. Жилищный фонд. 2. Транспортная инфраструктура (линейные сооружения железнодорожного и автомобильного транспорта). 3. Основные фонды ключевых отраслей экономики: сельского хозяйства и промышленности. 4. Основные фонды социальной сферы (объекты образования и здравоохранения). При этом необходимы данные не только об их текущей стоимости, но и о ее прогнозных значениях на долгосрочную перспективу, которые можно оценить с использованием данных о запланированных к реализации крупных инвестиционных проектах на рассматриваемой территории (подробнее методику оценки см. в работе [Badina, Pankratov, 2024]).

Пример интеграции расчетных значений показателей вышеперечисленных видов основных фондов в прогноз геокриологических изменений к середине XXI века и получившаяся на основании этого картина риска представлены в исследовании [Мельников и др., 2021]. Согласно проведенным оценкам, максимальная суммарная стоимость современных и будущих зданий и сооружений на мерзлоте выявлена в основных нефтегазодобывающих районах Ямало-Ненецкого Автономного округа – Ямальском, Пуровском, Тазовском, Надымском (свыше 800 млрд. рублей в каждом (здесь и далее – в ценах 2020 г.), крупнейших промышленных городах – Норильске, Новом Уренгое, Ноябрьске и Воркуте, современном и перспективном центре добычи углеводородов – Заполярном районе Ненецкого Автономного округа (свыше 300 млрд. рублей в каждом).

Наиболее усредненный сценарий изменения геокриологических условий до 2050 г. показал величину вероятных ущербов в 5 трлн рублей. Однако при реализации наиболее пессимистичного сценария эта цифра может достигнуть 9 трлн рублей. Максимальный абсолютный размер вероятного ущерба характерен для муниципальных образований Ямало-Ненецкого Автономного округа – даже при умеренном сценарии потепления он может превысить 500 млрд рублей, при том, что доходы бюджета региона в 2020 составили лишь порядка 200 млрд. рублей. Это говорит о крайне низком потенциале внутренних возможностей противостояния региональных экономик в случае единовременного и массового вывода из эксплуатации столь значительной доли зданий и сооружений, их, даже на примере этого одного из наиболее экономически развитых нефтегазодобывающих регионов-доноров федерального бюджета.

Исследование выполнено в рамках государственной бюджетной темы научно-исследовательской работы НИЛ геоэкологии Севера географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики», № 121051100167-1.

1. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2021, № 1. С. 14–31.
2. Badina S.V., Pankratov A.A. Coastal natural and economic systems of the Pechora-Kara region in the context of climate change risks. Экономика региона, 2024, 20(2). P. 506–521.
3. Streletskiy D.A., Suter L.J., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N., Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. Environmental Research Letters, 2019, 14 (2), 025003

КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ФОРМА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ГТМ ДЛЯ РАЙОНОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Дежникова А. А., Кузнецов М. Ф., Попова А. А.
ООО «Северные Изыскания», Москва
popovaaa@sev-iz.ru

Для предупреждения опасных ситуаций на объектах строительства необходимо проведение комплексного геотехнического мониторинга (ГТМ) на весь период строительства и эксплуатации сооружения.

Одной из наиболее серьезных проблем в районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) является растепление грунтов основания сооружений. Вследствие этого процесса происходит перестройка структуры, ухудшение прочностных и деформационных характеристик грунтов.

В технологической схеме проведения ГТМ в условиях распространения ММП необходим анализ и сопоставление всех факторов, приводящих к изменению теплового и механического взаимодействия инженерных объектов с сезонно- и многолетнемерзлыми грунтами основания. Картографическая форма анализа (карта-схема) результатов проведения ГТМ позволяет качественно оценить изменения, происходящие на каждом объекте строительства.

На карте-схеме результатов ГТМ показаны основные инженерно-геокриологические характеристики пород, необходимые для разработки рекомендаций для обеспечения надежности оснований в сложных условиях строительства: литологический состав грунтов; распространение, мощность и среднегодовая температура мерзлых пород; гидрогеологические условия; инженерно-геологические процессы; деформации сооружений; принципы строительства сооружений. Литологический состав грунтов традиционно отображен штриховкой, а геокриологические условия – цветом. Критические деформации сооружений и инженерно-геологические процессы – внемасштабными знаками. Данный способ представления результатов ГТМ является весьма наглядным, хотя и отягощен многообразными сложностями.

Для понимания исходной ситуации на площадке работ по архивным материалам инженерно-геологических изысканий (ИГИ) была составлена базовая инженерно-геокриологическая карта-схема. Благодаря ей появилась возможность сравнения исходных условий площадки с условиями, формирующимися в ходе строительства. Выделено 9 разновидностей грунтов по соотношению мощности насыпного щебнистого грунта и подстилающих его пород. Выделена 21 градация распределения мощности мерзлых пород и температуры грунтов по площади и разрезу.

При анализе материалов ГТМ сооружения (Рис. 1, А) можно сделать вывод о распространении зоны критических осадок. Система маркировок деформаций через каждые 3 см позволяет проследить развитие зоны осадок сооружений в каждый месяц проведения мониторинга и вовремя предусмотреть проведение необходимых мероприятий.

На фрагменте карты-схемы (Рис. 1, Б) изображено сооружение, запроектированное по II принципу строительства. Сравнивая фактические и архивные температурные данные, можно увидеть существенное и неравномерное изменение температурного состояния грунтов основания с переходом значений температур в отрицательный диапазон.

На строительных площадках редко удается одновременно установить все запроектированные элементы системы геотехнического мониторинга. Поэтому данные, получаемые по существующей сети ГТМ, недостаточны для полного анализа взаимодействия инженерных объектов с грунтом. Аппроксимация данных на соседние участки в некоторой степени решает эту проблему, но снижает достоверность результатов, поскольку они не подтверждаются полевыми измерениями.

Цифровые карты инженерно-геокриологических условий могут легко трансформироваться в прогнозные геокриологические карты (по мере накопления данных мониторинга). Таким образом, важной задачей является расширение сети геотехнического мониторинга, ее сохранность и более строгий подход к проведению режимных наблюдений, что позволит обеспечить надежную безаварийную эксплуатацию строящихся объектов и защиту окружающей их природы.

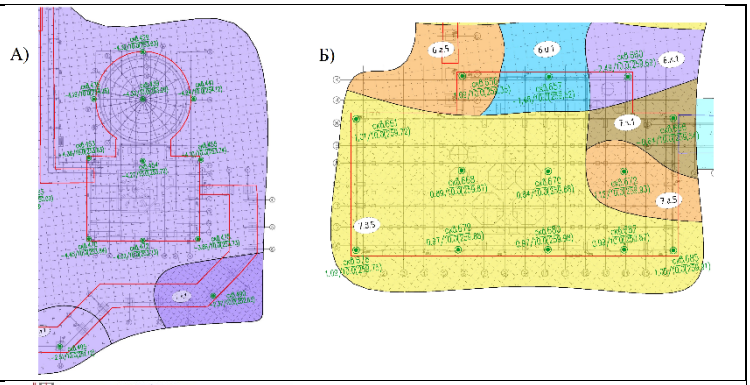
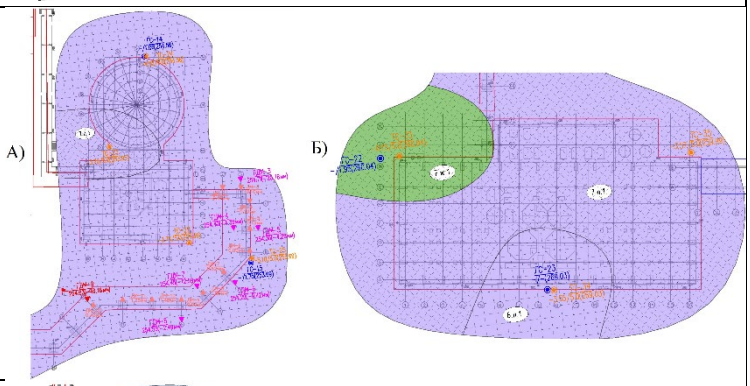
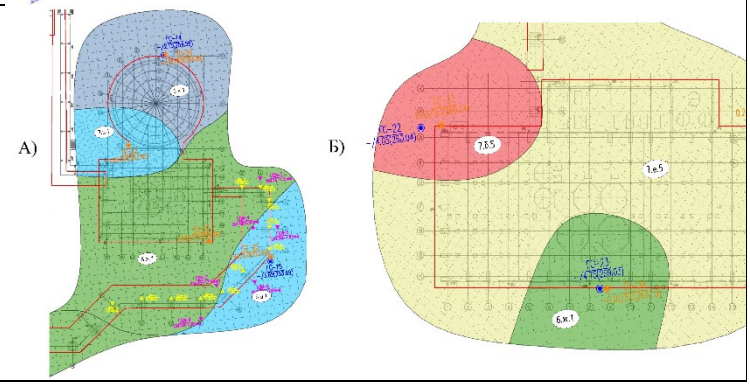
Архив ИГИ 2023 г.	
Июль ГТМ 2024 г.	
Октябрь ГТМ 2024 г.	

Рис. 1. Сравнение фрагментов карты-схемы результатов ГТМ по архивным и фактическим материалам

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЙ

Дембовский И.Н.
ООО «НТЦ Симмэйкерс», Москва, Россия
igor.dembovskii@simmakers.ru

Большое влияние на температурный режим многолетнемерзлых грунтов (ММГ) оказывают водные объекты, широко распространенные в криолитозоне. В некоторых районах доля водно-болотных угодий достигает 94% территории, а на территории п-ова Ямал насчитывается более 300 тыс. озер и 50 тыс. рек. Температурный режим и гидрогеологические условия таких территорий существенно осложняются наличием подозерных и подрусловых таликов, а дополнительное влияние оказывают фильтрационные процессы. Приток тепла за счет фильтрации грунтовых вод способствует деградации мерзлых грунтов, и непосредственно под негативным влиянием водных объектов находится вся дорожная сеть и транспортная инфраструктура в области распространения ММГ.

При проектировании путей сообщений необходимо точно прогнозировать температурный режим и состояние грунтов основания, а при эксплуатации – оценивать остаточное состояние их несущей способности. Для корректной прогнозной оценки температуры грунтов на участках, в пределах которых расположены водные объекты, необходимо учитывать фильтрацию воды.

В докладе рассматриваются примеры численного моделирования теплового режима грунтов оснований путей сообщений с учетом фильтрации воды в программе Frost.Термо, входящей в состав программного комплекса Frost 3D: оценка влияния озера на автодорогу; взаимодействие реки и мостового железнодорожного перехода; применение противофильтрационной завесы при проектировании взлетно-посадочной полосы.

Результаты численного моделирования температурного режима с учетом фильтрации и без учета существенно отличаются. Разница в положении кровли может достигать от 1 до 3 м, что при проектировании по 1 принципу (согласно СП 313.1325800.2017) предполагает применение дополнительных мероприятий по термостабилизации. Расчеты, не учитывающие фильтрацию, показывают результаты, не предполагающие дополнительных мероприятий, что в перспективе может привести к разрушению сооружения.

Предлагаемая методика проведения теплотехнических расчетов с учетом фильтрации позволяет оценить влияние водных объектов на основания путей сообщения в области распространения ММГ и повысить качество проектирования и безопасность эксплуатации.

СП 313.1325800.2017. Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства: свод правил: издание официальное: утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 14 декабря 2017 г. № 1669/пр: введен впервые: дата введения 15.06.2018 / подготовлен Департаментом архитектуры, строительства и градостроительной политики Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). - Москва: Стандартинформ, 2018. - 135 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЬДА

Джуманджи В.А., Шавлов А.В., Соколов И.В., Яковенко Е.С.
Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия
varjum@yandex.ru

Промышленное освоение северных и восточных регионов страны способствует развитию и распространению технологий использования льда в качестве строительного материала. Строительный лед должен иметь хорошую несущую способность, которая может быть обеспечена его высокой прочностью.

Существуют теплофизические способы воздействия на механические свойства льда, например, как термическая обработка, подразумевающая выдержку льда при температуре близкой к точке плавления. Этот метод влияет на скорость деформации, прочность, упругость и коэффициент трения льда. Подробной информации об этом, к сожалению, мало.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании влияния термической обработки на прочностную характеристику льда такую, как удельная энергия разрушения, методом ударного разрушения образцов льда и измерения диаметра отпечатка или глубины внедрения ударного инструмента в лёд.

В качестве ударного инструмента использовали стальной шар радиусом R=15 мм, массой m=110 г. Шар падал по почти вертикальному желобу (угол наклона к горизонтали 85°), не раскручиваясь. Высота падения составляла H=1 м. Шар перед испытаниями охлаждали до температуры льда. На Рис. 1(а) приведена фотография лунки, оставленной шаром на поверхности льда. Высота отскока шара от поверхности льда после удара составляла 1-3 мм. Следовательно, более 99% потенциальной энергии шара расходовалось на пластическую деформацию и разрушение льда.

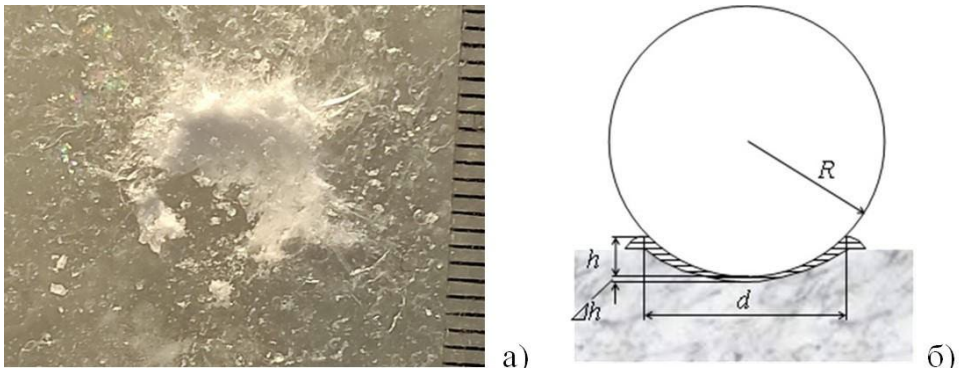


Рис. 1. Фотография лунки на фоне линейки с ценой деления 1 мм (а) и схема измерения параметров лунки (б). R – радиус шара, d – диаметр лунки, h – глубина лунки, Δh – толщина слоя разрушенного льда под дном лунки. Раздробленный лед показан на схеме штриховкой.

Лед приготавливали методом послойного замораживания слоёв дистиллированной воды до толщины около 4 см. Слой воды с температурой 25℃ наливали в металлический контейнер размерами 280×230×60 мм^3 и замораживали в морозильной камере в течение нескольких часов до температуры -18℃. Далее, контейнер нагревали на воздухе до температуры льда -4℃, затем наливали следующий слой воды и снова замораживали. Так три слоя – 2 см, 1 см и 1 см. Лед имел поликристаллическую структуру с размером зерна в несколько долей миллиметра, судя по его способности разрушаться на субмиллиметровые осколки размером около 0.5 мм под действием ударной нагрузки. Кроме того, лед содержал множество мелких воздушных пузырьков с концентрацией до 10 см$^{-3}$, размером в доли миллиметра, видимых невооруженным глазом.

Термическую обработку (отжиг) образцов льда выполняли при температурах -1.5 и 0℃. Влияние отжига льда на результаты испытаний демонстрирует Рис. 2. Температура испытаний -12℃. На Рис. 2(а) отжиг выполняли при температуре -1.5℃. С увеличением времени отжига, в интервале 1-48 часов (одного и того же образца), диаметр лунки уменьшается примерно на 20%. Наиболее быстрое уменьшение диаметра лунки наблюдалось в интервале времен отжига 0-5 часов. То есть, 5 часов - это время механической релаксации льда при температуре -1.5℃.

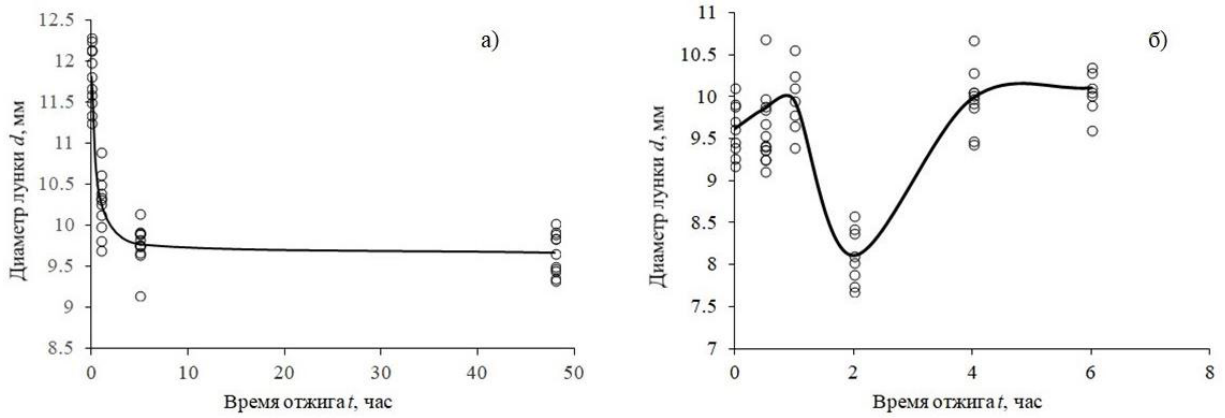


Рис. 2. Зависимость диаметра лунок *d* от времени отжига *t*. Температура отжига -1.5℃ (а), 0℃ (б). Температура проведения испытаний -12 ℃.

На Рис. 2(б) представлена зависимость диаметров лунок от времени отжига образца при более высокой температуре, вблизи точки 0℃. Среднее значение диаметра лунки (при температуре испытаний -12℃) проявляло сложное поведение. Сначала по мере отжига диаметр мог немного увеличиваться, затем уменьшаться и вновь увеличиваться на 20 %. Уменьшение и увеличение происходят за 1-2 часа каждое. То есть, время механической релаксации снизилось в разы по сравнению с образцами при температуре отжига -1.5℃.

Удельная энергия разрушения льда связана с диаметром лунки соотношением $\varepsilon_V = 20.4\frac{WR}{d^4}$, где *W* – энергия удара, *R* – радиус шара, *d* – диаметр лунки [1]. Таким образом, при отжиге при температуре -1.5℃ уменьшение диаметра лунок на 20 % связано с увеличением удельной энергии разрушения льда на 80 %. При отжиге при 0℃ диаметр лунок увеличивался на 10-20 %, а удельная энергия разрушения снижалась.

Увеличение ε_V при температуре отжига -1.5℃ было объяснено уменьшением удельной поверхностной энергии образования трещин и уменьшением размера осколков, на которые разрушается лед. Снижение ε_V при температуре отжига 0℃ объяснено процессами рекристаллизации льда, вследствие которых снижается плотность микротрещин в решетке льда и увеличивается размер осколков. Увеличение размеров осколков при отжиге при 0℃ подтверждено экспериментально.

Таким образом, отжиг способен заметно влиять на удельную энергию разрушения льда. Для упрочнения льда температура отжига должна быть высокой, но не слишком близкой к точке плавления для того, чтобы исключить рекристаллизацию, влекущую к разупрочнению материала, например, около -1℃.

Резюмируем, что термообработка является перспективным методом увеличения прочности льда. Очевидны перспективы возможного применения отжига для упрочнения морского льда и льдокомпозитных материалов.

Работа выполнена в рамках госзадания FWRZ-2021-0007.

[1] В.А. Джуманджи, А.В. Шавлов, И.В. Соколов, Е.С. Яковенко. Влияние «отжига» на удельную энергию разрушения послойно намороженного льда. Лед и снег, 2024, №3, 464.

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НА ФЕДЕРАЛЬНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ В КРИОЛИТОЗОНЕ

М.Н. Железняк, И.И. Сыромятников, А.В. Литовко, А.Р. Кириллин, Г.И. Шапошников и др.,
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск,
Lav_84@mail.ru

Рассмотрено влияние современного изменения климата на эксплуатацию федеральных автомобильных дорог в зоне развития многолетнемерзлых грунтов.

В современном мире автомобильные дороги являются одним из важнейших элементов инфраструктуры, которые имеют значительное влияние на развитие и жизнедеятельность любого региона страны. В настоящее время в северных и арктических регионах безопасная эксплуатация автомобильных дорог осложняется деформациями земляного полотна по причине деградации мерзлых грунтов основания и активизации опасных криогенных процессов [1, 2, 3, 4]. Как показывает опыт, в области распространения многолетнемерзлых грунтов деформации на автомобильных дорогах в основном проявляются в виде просадок и пучений земляного полотна, морозобойного растрескивания дорожной одежды, а также разрушений откосов под действием термоденудации.

Для выяснения причин возникновения этих явлений необходимы специальные исследования и на их основе разработка научно-обоснованных рекомендаций по предотвращению деформаций. Одним из методов проведения специальных исследований считается организация системы контроля за состоянием автомобильных дорог и дорожных конструкций [5, 6]. В рамках организации такой системы наиболее эффективным способом является создание постов геотехнического мониторинга на участках трассы автодороги с различными мерзлотно-ландшафтными условиями. Геотехнический мониторинг (ГТМ) – это система комплексного контроля, прогнозирования и управления состоянием природно-техногенных систем с целью обеспечения эксплуатационной надежности на всех стадиях жизненного цикла [7]. Анализ информации, получаемой с постов ГТМ на автодорогах, позволит оценить динамику состояния мерзлотно-грунтовых условий, выявить опасные криогенные процессы на ранней стадии их развития, а также своевременно разработать и применить превентивные мероприятия для сохранения устойчивого состояния автомобильных дорог.

В результате районирования составляются разномасштабные карты и схемы, включающие различные мерзлотно-грунтовые условия территории прохождения автомобильных дорог. В выделенных районах отмечаются ключевые участки с наиболее типичными природно-техногенными комплексами для организации мониторинга на их территории.

Федеральная автомобильная дорога Р-504 «Колыма» относится к IV категории и проходит по территории Республики Саха (Якутия) и Магаданской области. Протяженность автодороги от г. Якутска до г. Магадана составляет 2031 км. Это линейное сооружение является важным элементом инфраструктуры страны, так как обеспечивает территории двух крупных регионов, имеющие обширные запасы полезных ископаемых, выход на побережье Тихого океана.

Одной из важнейших задач исследований, являлось проведение мелкомасштабного мерзлотно-ландшафтного районирования участка автодороги «Колыма», пролегающего в пределах территории Якутии с протяженностью 1197 км. Для реализации поставленной задачи использовались материалы пространственного анализа мерзлотных условий автодороги «Колыма», проведенного Торговкиным Я.И. и др. [8]. Этот анализ был выполнен на основе Мерзлотно-ландшафтной карты Республики Саха (Якутия). Согласно карте, автодорога пересекает 8 мерзлотно-ландшафтных провинций, которые включают в себя 13 различных типов местности, различающихся мерзлотно-грунтовыми условиями (рис. 1).

Изучение материалов районирования показало, что в мерзлотном отношении наиболее сложным является участок автодороги, проходящий в пределах Лена-Алданского междуречья. Здесь основной ландшафтной единицей является межаласный тип местности с широким развитием отложений ледового комплекса. Эти отложения сложены супесчано-суглинистыми породами и характеризуются высоким содержанием повторно-жильных и текстурообразующих льдов. Толщи ледового комплекса особенно сильно подвержены деградации при изменениях климата и антропогенных воздействиях. Именно на территории Лена-Алданского междуречья такие толщи используются в качестве основания насыпи автомобильных дорог, поэтому существует угроза значительного снижения их несущей способности при современных тенденциях изменения климата.

В 2022 году сотрудниками Института мерзлотоведения СО РАН впервые в России был создан пост геотехнического мониторинга на автомобильной дороге общего пользования федерального значения Р-504 «Колыма» км148. На площадке поста был установлен комплекс оборудования для наблюдения за динамикой метеорологических и мерзлотных условий. В результате годового цикла наблюдений за метеорологическими условиями были получены данные, которые имеют близкие

значения с данными метеостанции Чурапча. Получены детальные характеристики изменения температурного режима грунтов (срочные, среднесуточные, декадные, среднемесячные, среднегодовая) для полосы отвода автомобильной дороги.

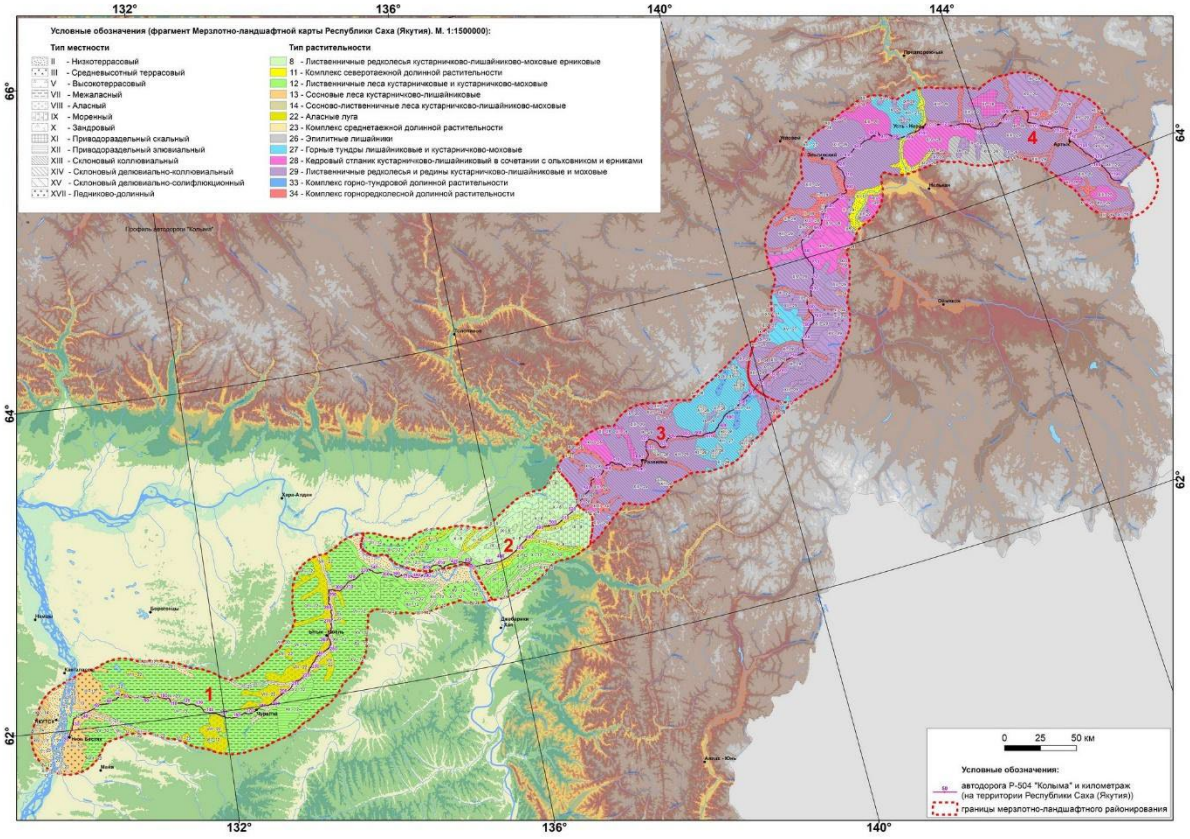


Рис. 2. Карта-схема мерзлотно-ландшафтного районирования автодороги Р-504 «Колыма» в пределах территории Республики Саха (Якутия)

В результате геотермических наблюдений установлено, что на глубине 3 м значение среднегодовой температуры грунтов на оси автодороги на 2,2°С ниже чем температура на откосе насыпи. Амплитуда максимальных и минимальных значений температуры грунтов на оси и на откосе насыпи на этой же глубине составила 10,0 и 3,2°С, соответственно. Эти параметры определяют температурный градиент в грунтах насыпи и её основания, что определяет механизм подтока (влагонасыщения) в сезонноталом слое и в основание полотна дороги.

На формирование температурного режима грунтов основания автодороги существенное влияние оказывает снежный покров. Регулярная уборка снега с поверхности асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги способствует интенсивному промерзанию земляного полотна и, в зависимости от количества зимних атмосферных осадков, определяет особенности формирования термо-влажностного режима грунтов на откосах и в основании насыпи.

1. Кондратьев С.В., Кондратьев В.Г. Причины деформаций автодороги "Амур" Чита - Хабаровск на участках льдистых многолетнемерзлых грунтов и пути их стабилизации // Политранспортные системы: материалы IX Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 17–18 ноября 2016 года – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 96-102.

2. Гребенец В.И. Исаков В.А. Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск-Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера Земли. – 2016. – Т. 20, № 2. – С. 69-77.

3. Толманов В.А., Гребенец В.И., Исаков В.А., Керимов А.Г-о. Деформации дорожного полотна в сложных мерзлотно-геологических условиях Норильского промрайона // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы докладов XIII Общероссийской конференции изыскательских организаций, Москва, 29 ноября – 01 декабря 2017 года. – М: Геомаркетинг, 2017. – С. 251-258.

4. Исаков В.А., Гребенец В.И., Фуникова В.В., Бабенко В.А., Исакова Д.И. Влияние квазистационарного температурного состояния геотехнических систем дорожных насыпей в криолитозоне на активность криогенных процессов // Инженерная геология. – 2020. – Т. 15, № 4. – С. 54-67. – doi: 10.25296/1993-5056-2020-15-4-54-67.

5. Сыромятников И.И., Литовко А.В., Жирков А.Ф., Кириллин А.Р. Организация мониторинговых площадок на автомобильных дорогах в криолитозоне // Мониторинг в криолитозоне: Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов, Москва, 14–17 июня 2022 года. – М.: "КДУ", "Добросвет", 2022. – С. 331-337.

6. Кондратьев В.Г., Соболева С.В. Концепция системы инженерно-геокриологического мониторинга автодороги «Амур» Чита-Хабаровск. – Чита: Забтранс, 2010. – 176 с.

7. Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф. Пространственный анализ распределения мерзлотных условий на Федеральной автодороге Р504 "Колыма" (Якутский участок) // Геоинформатика. – 2020. – № 3. – С. 46-52. – doi 10.47148/1609-364X-2020-3-46-52.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛЬДОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОДАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Жмаев М.В., Чувилин Е.М., Гребенкин С.И.
Сколковский институт науки и технологий, Москва
maksim.zhmaev@skoltech.ru

Исследование фильтрации газа в льдосодержащих породах криолитозоны в условиях ее деградации в настоящий момент времени представляет огромный научный интерес. Прежде всего это связано с проблемами добычи газа из низкотемпературных коллекторов в Арктике, в поровом пространстве которых может содержаться газовый гидрат, а также лед. С другой стороны, необходимость изучения фильтрационных свойств мерзлых пород обусловлена экологическими аспектами, которые касаются оценки миграции и эмиссии углеводородных (парниковых) газов из криолитозоны в атмосферу. При изменении термобарических условий толщ мерзлых газонасыщенных пород как в процессе антропогенного воздействия, так и в ходе естественных геодинамических процессов, могут возникать газовые скопления с повышенным давлением. Это может спровоцировать прорывы газа из мерзлоты, активную фильтрацию и выбросы газа в атмосферу, включая образование кратеров на суше и покмарков на шельфе арктических морей [1]. На сегодняшний день существует значительный пробел в специальных исследованиях, посвящённых изучению газодинамических процессов льдо- и гидратосодержащих пород в условиях деградации криолитозоны, особенно в диапазоне температур, близких к температурам фазовых переходов.

Для экспериментального моделирования этих процессов авторами совместно с компанией ООО “ЭкогеосПром” был разработан уникальный комплекс лабораторного оборудования. На его основе авторами было проведено специальное моделирование фильтрации газа в природных и модельных грунтовых образцах для комплексной оценки условий и механизмов возникновения фильтрационных процессов в льдосодержащих породах при повышении давления и растеплении, когда мерзлые породы перестают быть флюидоупором [2,3]. Использованная в экспериментах фильтрационная установка позволяла создавать термобарические условия в широком диапазоне температур (от -20 до +30°C) и давлений (до 10 МПа). В ее кернодержателе была реализована возможность одноосного сжатия грунтовых образцов, а также был установлен геофизический модуль. В ходе экспериментального моделирования помимо газопроницаемости (K_g, мД) исследуемого образца можно было определять относительные линейные деформации (ε, %), а также скорости упругих волн (V_p и V_s, м/с). В качестве объекта исследования использовалось два типа грунтов: суглинок, который был отобран на Ямале вблизи кратера газового выброса в долине р. Еркута и песчано-глинистая смесь (кварцевый песок с добавлением 25% монтмориллонита). Процедура экспериментов включала три основных этапа: подготовку грунтовых образцов с необходимыми параметрами влажности/льдистости, плотности; создание необходимых пластовых условий в экспериментальной установке и проведение фильтрационных испытаний в условиях высоких градиентов давления и нагревании, а также обработку экспериментальных данных. Эксперименты по лабораторному моделированию газодинамических процессов проводились на замороженных цилиндрических грунтовых образцах с заданной весовой влажностью в пределах от 11,3 до 28,5%, при этом их начальная объемная льдистость при температуре -10°C была в интервале от 10 до 40%.

В ходе экспериментов было выявлено, что при фиксированном газовом давлении около 2 МПа (ниже давления гидратообразования) в нагреваемых и изначально непроницаемых мерзлых грунтовых образцах фильтрация газа может возникать в области высоких отрицательных температур. Например, наблюдение за изменением газового давления на входе (P1) в образец мерзлого суглинка с начальной влажностью 28,5% не выявило фильтрацию газа при повышении температуры образца от -10 до -1°C, т.е. образец оставался непроницаем (рис. 1). Однако дальнейший медленный нагрев 0,1ºC/час позволил зафиксировать проникновение газа в образец при достижении температуры (T_{crit}) -0,4°C, при этом температура оттаивания для данного образца составляла -0,1°C. В момент газового прорыва давление P1 снизилось с 2 МПа до 1,77 МПа, а давление на противоположном торце образца увеличилось на 0,1 МПа, при этом газопроницаемость в момент прорыва газа достигала 0,1 мД.

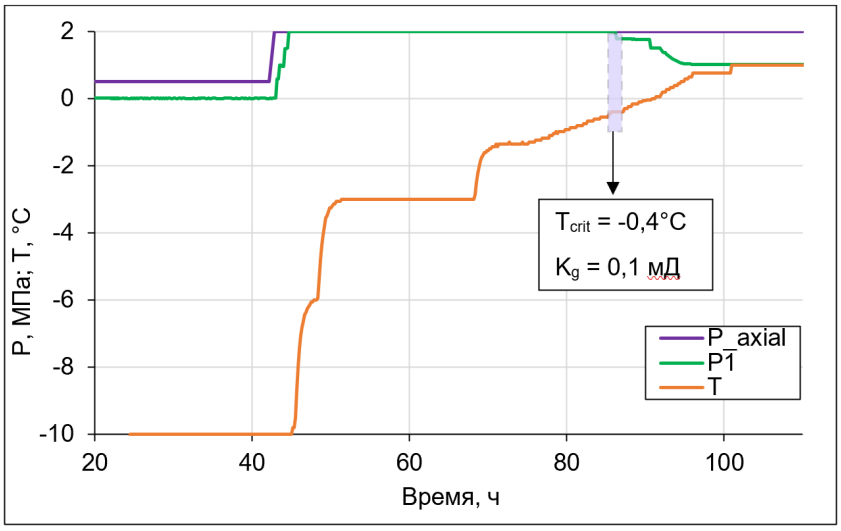


Рис. 1. Изменение термобарических условий в фильтрационном эксперименте в ходе медленного нагревания мерзлого образца суглинка. P_axial -осевое давление, P1 – давление на входе в образец, T – температура.

В результате экспериментального моделирования газодинамических процессов в мерзлых глинистых образцах с различной начальной влажностью (льдистостью) в спектре отрицательных температур была выявлена критическая температура, при которой происходит прорыв газа сквозь мёрзлый образец. Эта температура для мерзлых незасоленных грунтов при газовом давлении до 2 МПа была ниже температуры их оттаивания на 0,1-0,3°C, что обусловлено изменением фазового состава мерзлых грунтов при их растеплении.

1. Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D., et al. Evidence of gas emissions from permafrost in the Russian arctic // Geosciences, 2020, vol. 10 (10), 383.

2. Chuvilin E., Grebenkin S., Zhmaev M. Gas flow in frozen hydrate-bearing sediments exposed to compression and high-pressure gradients: Experimental modeling // Cold Regions Science and Technology, 2024, 228, 104310.

3. Чувилин Е.М., Гребенкин С.И., Жмаев М.В. Экспериментальное моделирование фильтрации газа в мерзлых и гидратосодержащих породах в условиях одноосного сжатия // Криосфера Земли, 2024, т. 28, № 6, с. 31–44.

ОПЫТ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗОН ОБХОДНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В БЕРЕГОВОМ ПРИМЫКАНИИ ГТС ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ - ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Истратов В.А.[1,2], Милановский С.Ю.[1,3]
[1] ИФЗ РАН, Москва
[2]ООО "Радионда", Москва
[3] ИГЭ РАН, Москва
istratov_v@mail.ru
svetmil@mail.ru

В районах вечной мерзлоты устойчивость инженерных сооружений, в том числе гидротехнических объектов, связана с процессами оттаивания - замораживания. Искусственные водоемы (водохранилища) в условиях вечной мерзлоты создают дополнительную тепловую и гидравлическую нагрузку на вмещающий мерзлый массив. Поэтому устойчивость плотин и их береговых примыканий является ключевым фактором безопасности. В ряде случаев, когда фильтрация развивается в проницаемой таликовой зоне, прилегающей к водохранилищу или непосредственно в теле плотины, это приводит к аварийной ситуации. В тоже время гидроузлы являются естественной лабораторией для изучения взаимодействия вечной мерзлоты - гидросферы - климата. Мы представляем результаты геофизического мониторинга гидротехнических объектов Западной Якутии вблизи Сытыканского и Вилюйского гидроузлов, который помогает понять пространственно-временные закономерности развития активных талых зон (талика) за относительно малый интервал времени. Обсуждаемый в докладе комплекс геофизических методов включал скважинные радиоволновые измерения состояния вечной мерзлоты вблизи гидроузлов на фоне ее теплового мониторинга. Показано, что для контроля изменения свойств ММП, подверженных деградации, особую значимость приобретает геофизический мониторинг состояния грунтового массива *in situ*. Режимные измерения методом межскважинного радиоволнового просвечивания по технологии объемного геоэлектрического картирования (4D РВГИ) и многочастотный диэлектрический каротаж (ДИМЧ), проводимые ООО “Радионда” и охватывающие период более 20 лет, позволили осуществить опережающий прогноз развития межмерзлотного талика в правобережных примыканиях ГТС. Так, на ВГЭС-1,2 в геокриологическом разрезе мерзлых пород с отрицательной температурой –(2~3)ºС еще 2022 году был выделен и прослежен интервал талых пород, по которому осенью 2024 года произошел локальный прорыв воды и установился канал круглогодичной обходной фильтрации. Одной из важных особенностей возникновения межмерзлотного активного талика в правобережных примыканиях ВГЭС-1,2 и Сытыкана следует считать наличие локального источника тепла, инициирующего его зарождение в береговом примыкании. На наш взгляд, таким источником является поток воды через обходной канал, греющий его дно и стенки. В сочетании с гидронапором он способствует прогрессивному развитию талика. Не следует исключать и наличие изначально воздушно-проницаемых мерзлых зон в трещиноватой среде берегового примыкания, связанных с тепловой историей последних. (Рис.1, 2).

Геофизическая информация была использована для построения и тестирования численных моделей взаимодействия антропогенного воздействия гидроузлов на систему "мерзлота - водоем - климат".

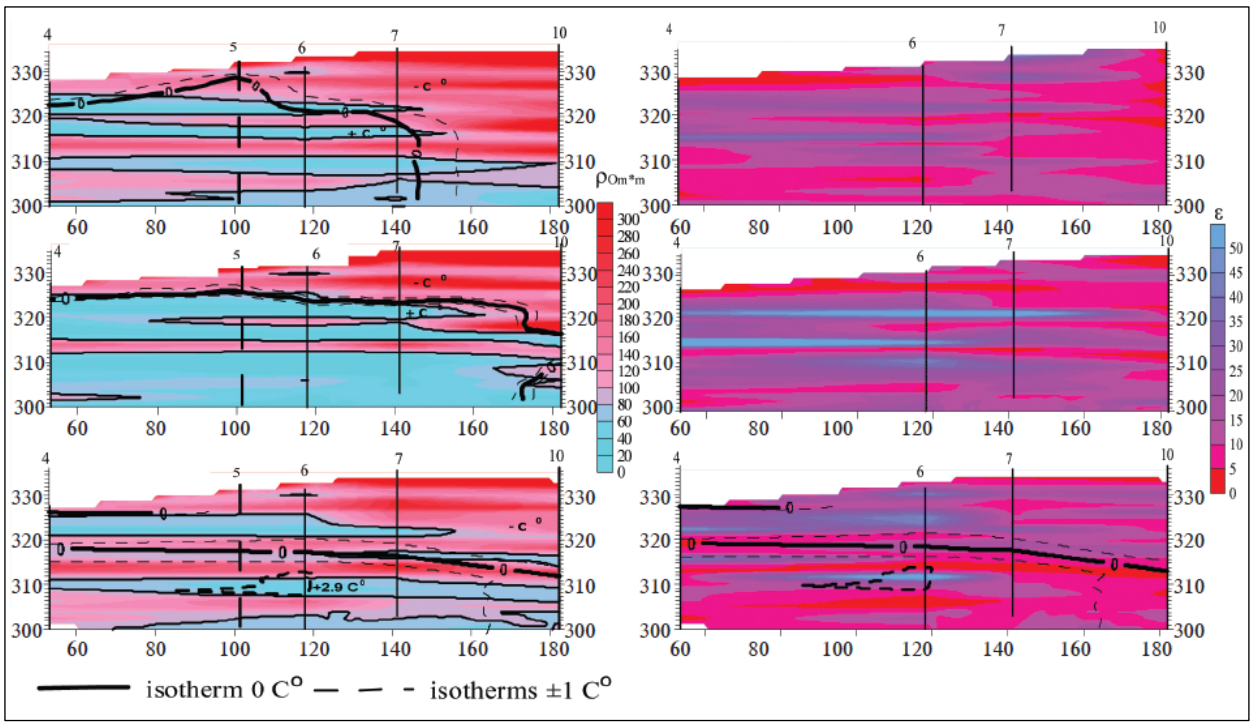


Рис.1. Примеры геоэлектрических разрезов: слева – эффективных сопротивлений (ρ); справа – относительной диэлектрической проницаемости (ε), по профилю скважин (4–5–6–7–10) в мерзлом массиве вкрест береговой линии Сытыканского гидроузла (Зап. Якутия); наблюдения ДИМЧ: вверху – март 2001; в середине – август 2001; внизу – март 2002. Для мерзлых пород характерно высокое ρ и низкое ε; для талых — низкое ρ и высокое ε. Уровень дна около плотины 301 м. По горизонтальным осям расстояние от береговой линии, по вертикальным — абсолютные отметки глубины, [м].

Решалась нестационарная задача тепломассопереноса в трещиновато-пористой насыщенной мерзлой среде. Модель анализирует возможные условия, вызывающие возникновение и развитие талика вблизи водохранилища, такие как колебания температуры воздуха, снежный покров, сезонное изменение температуры воды в водохранилище, изменение проницаемости мерзлого грунта и внутренней структуры мерзлого массива.

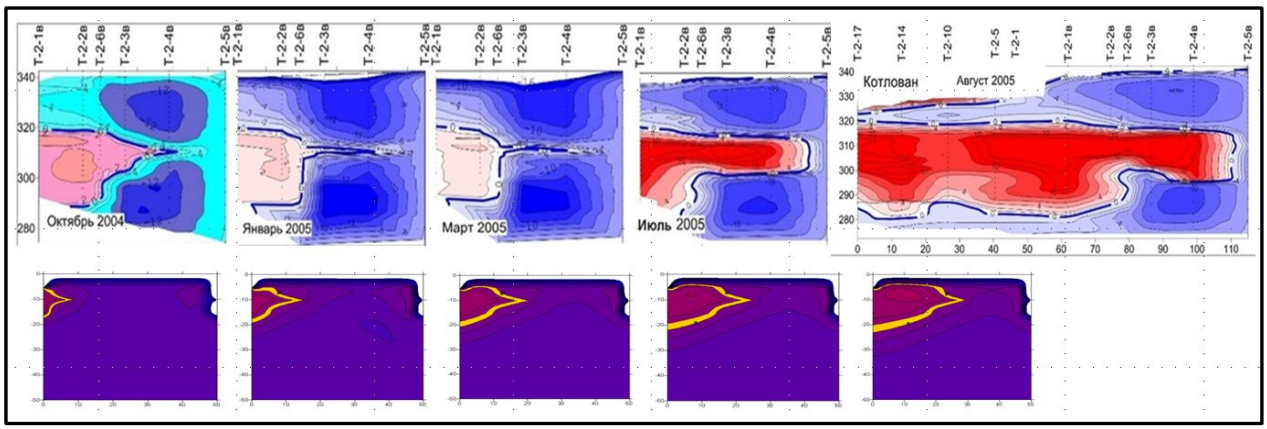


Рис.2. Температурная динамике прорыва мерзлотной завесы октябрь 2004 - август 2005 по проницаемой зоне аэрации на глубине 311м в правобережном примыкании Сытыкана (Великин, Чжан, 2025) с дополнением результатом моделирования развития фильтрации по сквозной проницаемой трещине в мерзлом массиве.

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ: ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ РЕШЕНИЯ

Коротков А. А., Кислов А. С.
ООО «НИИ Транснефть», Москва
KislovAS@niitnn.transneft.ru
KorotrovAA@niitnn.transneft.ru

В настоящее время теплотехнические прогнозные расчеты мерзлых грунтов играют ключевую роль при выборе технических решений по обеспечению устойчивости зданий и сооружений в криолитозоне и при контроле их технического состояния на стадии эксплуатации. Теплотехнический прогноз составляется на стадии проектирования для определения технических решений, необходимых для обеспечения надежности оснований и фундаментов проектируемых зданий и сооружений на весь период эксплуатации. Для составления прогноза могут быть применены как численные, так и аналитические модели, описывающие взаимодействие в системе «сооружение – грунт»[1],[2],[3]. В настоящее время наиболее широкое применение для теплотехнического прогноза приобрел численный метод решения уравнения нестационарной теплопроводности с фазовыми переходами грунтовой влаги, описанный в РСН 67-87[4]. Указанный метод реализован в целом ряде программных продуктов, представленных на рынке, а так-же возможно его использование при создании специализированных программ на современных языках программирования (Python и т.д.[5]). Математическое решение теплотехнической задачи довольно подробно разобрано в большом количестве прикладной и научной литературы, при этом имеется определённый методический «пробел» в области формирования расчетных схем и работы с исходными данными, особенно в части проведения теплотехнических расчетов уже эксплуатируемых сооружений.

Необходимость проведения теплотехнических расчетов на стадии эксплуатации обусловлена целым рядом факторов, влияние которых зачастую не получается учесть на стадии проектирование, к которым можно отнести:

- расхождение сценариев изменения температуры приземного воздуха используемого на стадии проектирования, с фактическим изменением климатических условий (к примеру, для пос. Тазовский в зависимости от выбора периода наблюдений (с 1936 или 1990 года, величина линейного тренда изменения среднегодовой температуры воздуха изменяется от 0,03ºС/год до 0,1 ºС/год).
- изменение фактической работоспособности систем термостабилизации грунтов (далее – ТСГ) (по данным наблюдений может происходить снижение общего теплового потока в грунт в 3-4 раза от паспортных характеристик для формально работоспособных устройств) и теплоизолирующих материалов, в том числе возможность их деградации в ходе строительства и эксплуатации;
- изменение эксплуатационных температурных параметров зданий и сооружений;
- нарушение правил эксплуатации и строительства зданий и сооружений;
- изменение гидрогеологических условий в процессе эксплуатации;
- высокая погрешность при определении свойств грунтов на стадии инженерных изысканий;
- «человеческий фактор» при проведении измерений параметров объектов и окружающей среда при геотехническом мониторинге на стадии эксплуатации.

Основным отличием теплотехнических расчетов на стадиях проектирования и эксплуатации является необходимость калибровки математической модели по данным фактический измерений на уже действующем объекте. Для выполнения калибровки математической модели должны быть обеспечены следующие условия:

- обеспечение достоверности и достаточности данных наблюдений о состоянии геотехнической системы (наличие фоновых измерений температуры грунтов, данных снегомерных наблюдений, данных термометрических наблюдений, сведений об условиях включения/выключения термостабилизаторов грунта, фактической их холодопроизводительности, сведения о сезонной динамике грунтовых вод и т.д.);
- выбор параметра системы за счет которого выполняется калибровка (как правило используются условия теплообмена на поверхности, параметры холодопроизводительности термостабилизаторов).

Калибровка математической модели проводится в два этапа:

- на первом этапе по данным фоновых скважин определяется общее климатическое влияние на геотехническую систему (определяются условия теплообмена на поверхности грунта вне зоны техногенного воздействия);

– калибровка по данным измерений температуры грунтов в зоне техногенного влияния (используется параметры холодопроизводительности ТСГ, граничные условия на поверхности в зоне техногенного условия, а также параметры теплового взаимодействия сооружения и грунта).

Откалиброванная математическая модель позволяет более достоверно определять дату достижения предельного состояния и назначать необходимые компенсирующие мероприятия.

При невозможности калибровки математической модели по данным фактических измерений в зависимости от полученной картины отличий определяются требуемые дополнительные обследования объекта для уточнения фактических условий эксплуатации и параметров объекта.

В целом при проведении теплотехнических на практике зарекомендовал себя следующий порядок действий:

1. Не рекомендуется помещать в расчетную область сооружения с разными типами теплового воздействия (трудности при калибровки математической модели) и задании начальных условий расчета;
2. В качестве начальных условий в силу трудности прогнозирования строительного периода рекомендуется использовать измерения по ближайшей фоновой скважине;
3. Границы расчетной области формировать с учетом минимального воздействия соседних сооружений;
4. В качестве критерия калибровки принять среднюю температуру в термометрической скважине (за вычетом зоны сезонного протаивания-промерзания) с учетом двойной погрешности термометрического оборудования;
5. Температурное поле на текущую дату рекомендуется воспроизводить численно (по худшей скважине).

В целом можно говорить, что качественно выполненный теплотехнический расчет на стадии эксплуатации позволяет определить причину отклонения температурного режима от проектного состояния. В итоге это позволяет потенциально сократить расходы на дополнительные инженерные изыскания и дополнительные наблюдения по геотехническому мониторингу.

Опыт проведения подобных расчетов показал необходимость на нормативном уровне проработки ряда дополнений к существующим требованиям по геотехническому мониторингу:

– разработка единой методики оценки не только работоспособности, но и хладопроизводительности ТСГ (включающий контроль температуры и давления);
– наличие в ТСГ клапана контроля давления хладагента;
– обязательное наличие на объекте мониторинга фоновых термометрических скважин;
– разработка единых норм на порядок проведения теплотехнических расчетов и определение порядка включения теплотехнических расчетов в работы по геотехническому мониторингу.

1. Зализняк В.Е. Основы вычислительной физики. Часть 1. Введение в конечно-разностные методы, М: Техносфера, 2008
2. Берковский Б.М. Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена, Минск: Наука и техника, 1976
3. Порхаев Г.В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами, М: Изд-во «Наука», 1970
4. РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства составления прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами, Госстрой РСФСР, 1987
5. Титов А.Н., Тазиева Р.Ф. Решение задач линейной алгебры и прикладной математики в Python. Работа с библиотекой SCIPY, Казань, 2023

О ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕДЕНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА И АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Кушуков С.В.[1], Иванов К.Н.[1], Левашкин С.П.[1], Бубнова Е.Ю.[1],Якобовский М.В.[2]
[1] *Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Научно-исследовательская лаборатория «Искусственный Интеллект», Самара*
[2] *Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*
ai_lab@psuti.ru

Рассмотрены ключевые аспекты обработки первичных данных натурных исследований поведения природно-технических систем при изменении климата и антропогенных воздействиях в условиях Крайнего Севера с использованием языка программирования Python. В современном информационном обществе, где данные занимают центральное место в научных исследованиях, бизнесе и других сферах, эффективная обработка данных становится необходимым элементом для принятия обоснованных решений. Исследование охватывает основные этапы обработки данных, начиная с предобработки и подготовки данных с применением Python-библиотек, таких как pandas и numpy, и заканчивая предварительным анализом данных. Изучение природно-технических систем (ПТС) в условиях изменения климата и антропогенных воздействий, особенно в сложных условиях Крайнего Севера, представляет собой важную научную задачу. Эти системы формируются в результате взаимодействия природных процессов и технических объектов, а их устойчивость во многом зависит от динамики внешних факторов. Для выявления закономерностей функционирования ПТС и прогнозирования их возможных изменений требуется комплексный анализ данных. Обработка информации, полученной в ходе натурных исследований, включает несколько этапов: сбор первичных данных, их предварительную обработку, анализ и интерпретацию результатов [1]. Цель данной работы — разработка методов автоматизированной обработки натурных данных, что позволит выявить ключевые тренды и паттерны во взаимодействии природных и техногенных факторов [2]. Актуальность исследования обусловлена необходимостью принятия обоснованных решений для обеспечения устойчивого функционирования и управления природно-техническими системами в условиях нарастающего климатического и антропогенного воздействия [3-6].

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10032.

[1] Левашкин С.П., Иванов К.Н., Кушуков С.В. Ферма данных: информационная система сбора, хранения и обработки неструктурированных данных из разнородных источников // Труды Института системного программирования РАН. 2023. 22, № 35(2). 57–72. doi https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2023-35(2)-5.

[2] Рожков Р.С., Молчанова Е.С., Фадеев М.К., и др. Управление природно-техническими системами через концепцию устойчивого развития и приемлемого риска // Вестник евразийской науки. 2014. 6, Т 16. 1–10. https://esj.today/PDF/55FAVN524.pdf.

[3] Дрегуло Н. Влияние климатических факторов на эксплуатацию ПТС, связанных с обработкой отходов водоотведения. https://clck.ru/3FzVgH. (Дата обращения: 13 января 2025).

[4] Влияние антропогенных факторов на тепловое загрязнение городской среды. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7635. (Дата обращения: 13 января 2025).

[5] Влияние антропогенных факторов на развитие сельского хозяйства. https://biohim.com.ru/articles/page2. (Дата обращения: 13 января 2025).

[6] Балута В.И., Варыханов С.С., Жирков А.Ф., Карандеев А.А., Левашкин С.П., Осипов В.П., Рыков Ю.Г., Сивакова Т.В., Четверушкин Б.Н. О разработке самообучающейся системы диагностики состояния природно-технических систем. X международная конференция по математическому моделированию https://www.s-vfu.ru/universitet/nauka/mkmm2023/ (Дата обращения: 13 марта 2025).

СИСТЕМЫ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Макарычева Е.М., Кузнецов Т.И.
Центр мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта
ООО «НИИ Транснефть», Москва
MakarychevaEM@niitnn.transneft.ru

ООО «НИИ Транснефть» с 2011 года разработана и внедрена система мониторинга объектов магистральных нефтепроводов (далее - МН) ПАО «Транснефть», расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (далее - ММГ) и сложных природно-климатических условиях («ВСТО», «Заполярье – НПС Пур-Пе», «Пур-Пе – Самотлор», «Куюмба-Тайшет», «Тарасовское – Муравленковское», «Холмогоры – Клин», «Уренгой – Холмогоры» и «Уса – Ухта») с общей протяженностью более 7 000 км в рамках которой выполняются систематические наблюдения, измерения и контроль их параметров.

Обследования и контроль состояния объектов МН осуществляются по средством систем периодического и непрерывного автоматизированного мониторинга. При необходимости дополнительно в программы мониторинга включаются наземные, комиссионные обследования, контроль за состоянием подводных переходов МН, контроль за состоянием компенсирующих мероприятий (в том числе термостабилизаторов грунта) и работы по привязке реперов. Внедрены методики автоматизированной обработки данных периодических обследований [1].

Сбор информации на базе систем периодического мониторинга осуществляется методами полевых наземных (традиционной геодезии, геологических, геофизических, гидрометеорологических и рекогносцировочных) и дистанционных обследований (в том воздушных и наземных лазерных сканирований), внутритрубной диагностики и включает в себя контроль: состояния оснований фундаментов; состояния ММГ; геологических процессов; геометрии и напряженного-деформированного состояния (далее - НДС) нефтепроводов [2].

Наблюдательная сеть мониторинга обеспечивает сбор информации согласно перечню параметров требуемых для выполнения прогнозных расчетов (температуры стенки МН по всей длине нефтепровода, ореолов оттаивания и осадки грунтов в течении всего периода эксплуатации, изменения планово-высотного положения секций трубопровода и НДС трубопровода на участках распространения ММГ), а также на основе потребностей эксплуатирующих организаций системы «Транснефть». С целью обеспечения репрезентативности наблюдений пространственное расположение пунктов выбрано с учетом природной изменчивости территории на основе принципов необходимости и достаточности. Частота и периодичность наблюдений определена на основе требований к точности прогнозных моделей, требований действующей нормативной документации и эксплуатационной безопасности.

Системы непрерывного автоматизированного мониторинга применяются на участках развития опасных эндогенных и экзогенных геологических процессов и выполняют функции контроля и экстренного реагирования. Комплексная система контроля сейсмических воздействий разработана для трубопроводной системы «ВСТО», она имеет в своем составе сеть сейсмостанций с шагом от 70 то 150 км, оборудованных сейсмодатчиками и позволяет автоматически оставить транспортировку нефти. Системы оценки работоспособности после воздействий включают модули автоматического расчета параметров землетрясений и НДС каждой трубной секции с функцией выдачи протокола расчета с перечнем секций, по которым были превышены пороговые значения напряжений.

Для предупреждения возможного негативного воздействия при смещениях массивов грунта оползнеопасные участки МН оборудованы системой контроля устойчивости склонов включающей инклинометрические приборы и точки измерения уровня подземных вод. В зонах потенциального оползневого воздействия и в зонах тектонических разломов реализована система непрерывного контроля напряжений в стенке трубопровода с применением интеллектуальных вставок с измерительными тензодатчиками, позволяющая изолировать поврежденный участок и предотвратить аварийную ситуацию.

Для обеспечения сходимости результатов периодических обследований в рамках геотехнического мониторинга внедряется методика организации единого координатного пространства на объектах МН с применением местной автоматизированной геодезической сети (далее - МАГС) и корпоративной системы координат. МАГС реализуется на основе постоянно действующих референцных станции и включает в себя целый комплекс автоматизированных систем, в т.ч. спутниковое оборудование (ГНСС приемники), позволяющие получать стабильные спутниковые измерения, непрерывно 24 часа в сутки 7 дней в неделю [3].

Разработанная ООО «НИИ Транснефть» геоинформационная система «Мониторинг» обеспечивает основу для комплексного анализа результатов геотехнического мониторинга. Геоинформационная система аккумулирует данные по объектам за весь жизненный цикл, она имеет встроенные программно-аналитические модули, позволяющие обрабатывать данные проектной, исполнительной документации, результаты обследований и измерений [4].

Расчеты прогнозного и текущего состояния трубопровода сравниваются с предельными значениями и по итогам сравнения применяются либо оперативные компенсирующие мероприятия (например, замена секций нефтепровода), либо плановые мероприятия (например, теплоизоляция, подземные опоры).

Внедренная система мониторинга объектов позволяет проводить анализ и установление причин возникновения ненормативных состояний МН. Выделены основные факторы появления ненормативных радиусов изгиба перемещений секций трубопровода за период эксплуатации МН в условиях распространения ММГ. Существующие разработки, методики и схемы производства работ, обеспечивают надежную эксплуатацию МН в криолитозоне.

1. Половков С.А., Ибрагимов Э.Р., Кузнецов Т.И., Барышев А.И., Покровская Е.А., Бухаркин Ю.А., Каптур А.А. Автоматизация обследований систем термостабилизации объектов на многолетнемерзлых грунтах // Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа. 2021. С. 18-23.

2. Макарычева Е. М., Ибрагимов Э. Р., Кузнецов Т. И., Шуршин К. Ю. Применение воздушного лазерного сканирования для геотехнического мониторинга объектов магистрального трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 1. С. 21-31.

3. Куприянов М. С., Гасилин М.П., Макарычева Е. М., Кузнецов Т. И. Организация высокоточной координатной системы на объектах магистральных трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Т. 13. № 6. С. 512–521.

4. Макарычева Е.М., Кузнецов Т.И., Половков С.А., Барышев А.И., Покровская Е.А. 3D-ГИС для сопровождения работ по геотехническому мониторингу объектов магистральных трубопроводов // Наука и технологии трубопровода транспорта нефти и нефтепродуктопроводов. 2020. Т. 10. № 4. С 342-351.

ФОРМУЛА РАСЧЕТА ВЫСОТЫ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Марахтанов В.П.
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
ecolog_n@mail.ru

Природа проста
и не роскошествует
излишними причинами.

И. Ньютон

При строительстве в районах глубокого зимнего промерзания грунтов, существует необходимость устранения (или, по крайней мере, снижения) отрицательного воздействия процесса морозного пучения на техническое состояние зданий и сооружений. Исследования в данном направлении проводятся многие десятилетия, что привело к созданию обширнейшей эмпирико-теоретической базы, включающей многочисленные нормативные документы, монографии, статьи и пр. Несмотря на это, до сих пор отсутствует строгое *аналитическое* решение важнейшего параметра процесса морозного пучения грунта – *высоты* поднятия земной поверхности в зависимости от мерзлотно-геологических факторов, веса конструкций и воздействия мероприятий, препятствующих их выпучиванию. Причиной этого, как отмечалось еще более полувека назад самими исследователями морозного пучения грунтов, является то, что во всех предложениях по методике исследования пучения «не раскрывается природа сил пучения и условия формирования силы выпучивания» [1], до сих пор положение дел не изменилось.

Как показал автор [2], физическая сущность процесса криогенного пучения сводится к проявлению действия третьего закона Ньютона в системе «талый-мерзлый грунт», когда мерзлый грунт, по мере промерзания и увеличения его объема, испытывает силовое противодействие со стороны талого грунта. При этом следует различать 2 типа грунтовых систем – замкнутые и открытые.

В *замкнутых* системах некуда деваться избытку воды (9 %) при переходе ее в лед, что приводит к возрастанию давления в талой толще и понижению вследствие этого температуры замерзания воды, что препятствует образованию льда. Силы морозного пучения в замкнутых системах возникают под давлением растущих кристаллов льда, что вполне согласуется с традиционными представлениями. Примером проявления в природе сил морозного пучения в замкнутых системах является образование сезонных и многолетних бугров при промерзании локальных таликов в мерзлой толще. Результаты исследования выпучивания опытных свай на модели, имитирующей природные условия замкнутых систем, представлены, в частности, в [3]. Отметим также, что в *лабораторных* условиях, когда образец грунта помещается в кассету с жесткими стенками и опирается на практически несжимаемый песок, по существу исследуются замкнутые системы и полученные данные нельзя автоматически распространять на природные условия, в которых преобладают открытые системы.

В *открытых* системах (например, в районах сезонного промерзания) нет физических условий для нарастания давления в талой толще, подстилающей промерзающий грунт. Там в тонкодисперсных влажных грунтах (наиболее подверженных пучению) противодействие промерзанию со стороны талого грунта осуществляется через выталкивание им обладающего меньшей плотностью мерзлого массива под действием *архимедовой* силы [2]. Подобный механизм пучения, учитывая физические условия его проявления в грунтовой среде, можно называть *литостатическим*. В основе этого механизма лежит стремление системы «талый-мерзлый грунт» к положению *статического равновесия*, при котором выталкивающая (архимедова) сила, действующая на подземную часть мерзлого массива ($F_в$) равна весу массива (G) плюс нагрузка на массив (P) плюс сила сопротивления выталкиванию (F_c) [2]:

$F_в = G + P + F_c$ (1).

Если мерзлый массив имеет форму цилиндра (в том числе и неправильного) или параллелепипеда, то выражение (1) приводится к следующему виду [2]:

$g(\rho_т - \rho_м)S(H - h_p) = g\rho_т S h_p + P + F_c$ (2),

где g = 9,81 м/сек^2 – ускорение земного тяготения; $\rho_т$ и $\rho_м$ – плотность соответственно талого и мерзлого грунта, т/м^3; S – площадь поверхности мерзлого массива, м^2; H – толщина массива (глубина промерзания), м; h_p – высота пучения, м; P и F_c выражены в кН. Из выражения (2) получается *формула расчета высоты пучения мерзлого массива в положении статического равновесия:*

$$h_p = H\left(1 - \frac{\rho_м}{\rho_т}\right) - \frac{P + F_c}{g\rho_т S} \quad (3)$$

Справедливость формулы (3) обоснована опытами автора, а также результатами полевого эксперимента В.О Орлова по измерению нормальной силы пучения [2]:

При проектировании объектов строительства необходимо обеспечить такие значения параметров формулы (3), чтобы выполнялось условие: $h_p \leq 0$, при котором выпучивание конструкций невозможно. Отсюда мы приходим к следующему выражению:

$$Hg(\rho_m - \rho_м) \leq \frac{P + F_c}{S} \quad (4)$$

Оба члена формулы (4), в соответствии с размерностью параметров формул (2) и (3), имеют размерность кН/м^2, представляя собой давление на 1 м^2 поверхности мерзлого массива разнонаправленных сил. Слева мы имеем давление направленной вверх архимедовой силы, являющейся, по сути, общеизвестной *нормальной* силой морозного пучения. Справа – давление направленной вниз суммарной силы, противодействующей пучению.

Для выполнения расчетов необходимо, кроме всего прочего, знать величину *S*, которая в конкретных природных условиях в большинстве случаев неопределима. Но можно *задать* ее следующим образом. Вокруг строительной площадки создается «талый пояс» из теплоизолирующих материалов, препятствующих зимнему промерзанию грунта (методика создания подобных устройств существует и здесь не рассматривается). Таким образом вычленяется мерзлый массив известной площади *S* (по возможности, наименьшей), окруженный со всех сторон талым грунтом, что позволяет применить к конкретным условиям строительства изложенный выше подход. Дополнительно поясним, что параметр F_c задается в том случае, если вес сооружения *P* не обеспечивает выполнения неравенства (4). Проще всего это сделать путем дополнительного устройства свайного основания, удерживающего конструкции от выпучивания за счет трения свай о талый грунт.

1. Саркисян Р.М., Орлов В.О. Обзор принципов расчета морозного выпучивания фундаментов и предложения по их совершенствованию // Строительство на вечномерзлых грунтах том V, вып. 1. Красноярск, 1970, с. 44 – 54.

2**.** Марахтанов В.П. Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов под воздействием архимедовой силы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, издательство ООО ИД «Академия Естествознания» (Пенза), № 4(часть 4), с. 748-759.

3. Пазиняк В.В., Кутвицкая Н.Б., Минкин М.А. Экспериментальные исследования устойчивости трубопроводов на крупномасштабной грунтовой модели // Криосфера земли. 2006. Т. X. №1. С 51–55.

ИНЖЕНЕРНЫЙ АСПЕКТ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МЕРЗЛОТЕ

Милановский С.Ю.[1,2], Трифонов Б.А.[2]
[1] *ИФЗ РАН, Москва*
[2] *ИГЭ РАН, Москва*
svetmil@mail.ru

Опыт изучения последствий сильных землетрясений, а также анализ результатов работ по микросейсморайонированию (МСР) свидетельствуют о том, что величина и характер сейсмического воздействия определяются, помимо региональных, многочисленными локальными особенностями геологической среды. Основные характеристики сейсмического сигнала важные с инженерной точки зрения расчетная акселерограмма - ускорение колебания поверхности и ее пиковое значение (PGA-A_{max}), ее спектр реакции - отклика Sa частотный состав колебаний и характер затухания колебаний в приповерхностном (инженерном слое). Представление о балльности также используется сейсмологами. Локальные сейсмические характеристики приповерхностных грунтов, наряду с магнитудой землетрясения и его удаленностью и характеристикой его очага, существенно влияют на интенсивность колебаний на дневной поверхности. Если в случае температурно-положительных грунтов локальное проявление сейсмического эффекта определяется в основном сейсмическими скоростными (упругими) характеристиками пород (скальных либо дисперсных), слагающих изучаемый в инженерной сейсмологии интервал глубин (верхние 30м), то в случае мерзлоты, важнейшим фактором становится цементация льдом дисперсных пород.Локальные сейсмические характеристики приповерхностных грунтов, наряду с магнитудой землетрясения, и его удаленностью и характеристикой его очага, существенно влияют на интенсивность колебаний на дневной поверхности. Переход грунта из мерзлого в талое состояние и наоборот сопровождается резким изменением его физических свойств (в первую очередь упругих), что следует учитывать при прогнозе параметров сейсмических воздействий, особенно для ответственных промышленных сооружений. На участках распространения мерзло-талых грунтов существует необходимость изучения влияний на сейсмические свойства грунтов разной литологии, обусловленных климатическими и антропогенными факторами. Наряду с широко обсуждаемой механичекой потерей несущей способности деградирующей мерзлоты, необходимо внимание к изменениям проявления сейсмического эффекта от землетрясений на мерзлоте и при ее деградации. Наиболее сложные и значительные криогенные преобразования имеют место в дисперсных песчано-глинистых и сильнотрещиноватых скальных мерзлых породах. Это оказывает влияние на их упругие, электрические, фильтрационные и механические свойства. Важен пространственный масштаб скоростных неоднородностей, связанных с деградацией мерзлоты, частотный состав и характерные длины сейсмических волн из ближней и дальней зоны. Оценки изменения сейсмической опасности в районах распространения многолетнемерзлых пород приобретает все более важное значение для понимания рисков связанных с изменением климата и антропогенными воздействиями приводящими к деградации мерзлоты на различных пространственных масштабах. Специальные исследования динамики деградирующей мерзлоты необходимы вблизи ответственных промышленных сооружений (гидротехнических сооружений, АЭС или структур нефтегазового комплекса) взаимодействующих с криосферой. Такие исследования следует рассматривать как прикладные, так и в качестве модельных, позволяющих на сравнительно малых временах наблюдений, анализировать перспективы и процессы, связанные с глобальными климатическими изменениями.

Наши модельные исследования деградирующей мерзлоты показали, что нет устойчивой закономерности изменения ее реакции на внешние сейсмические воздействия. Возникает фактор неопределенности в оценке проявления сейсмичности на мерзло-талых грунтах связанный с многобразием геокриологических разрезов и их откликов на климат и техногенез. В ряде случаев расчет сейсмичности при строительстве и эксплуатации на многолетнемерзлых грунта по принципу I (нет оттаивания) и II (допускается оттаивание грунтов оснований) вступает в противоречие с реальностью, где граница между I и II размывается. Их следует рассматривать по фактическому состоянию после оттаивания, поскольку возникает неопределенность расчета приращения балльности (ΔI) для оценки величины сейсмических интенсивности в баллах. Геокриологический прогноз эволюции мерзлых толщ необходимо использовать для оценки изменения сейсмических условий в сейсмоактивных районах и сейсмического отклика. Заметим, что имеющиеся прогнозные карты ОСР территории России в настоящее время не рассматривают фактор деградирующей мерзлоты в сейсмоактивных районах, который в общем действует в сторону повышения балльности территории. В докладе будут представлены результаты исследований реакции грунтовой толщи на сейсмические воздействия в условиях криолитозоны – мерзлых и талых грунтов и их комбинаций. По результатам исследований выполнен анализ изменения сейсмических свойств массива мерзло-талых

грунтов и оценено влияние этих изменений на амплитудно-частотный уровень сейсмической сотрясаемости при землетрясении. Для различных вариантов сейсмогеологических моделей (СГМ) на основе математического моделирования получены расчетные оценки изменения сейсмического эффекта при воздействии высокочастотного и низкочастотного сигналов. Показано, что уровень сейсмической реакции массива грунтов криолитозоны, содержащего зону талика, определяется его расположением в массиве многолетнемерзлых пород (ММП), а также свойствами и отношением мощностей талых и мерзлых слоев. Результаты численного моделирования позволяют обосновано подходить к решению задач сейсмического микрорайонирования по оценке и прогнозу сейсмических условий на территориях со сложным инженерно-геокриологическим строением. На примере Билибинской АЭС, построенной на многолетнемерзлых породах, показано, что упругие свойства скальных мерзлых грунтов, как правило, трещиноватых в верхней части разреза, зависят в том числе и от криогенного состояния породы. Проанализированы изменения сейсмических свойств мерзлых скальных грунтов, оттаявших под воздействием основных сооружений реакторных блоков за 30 лет. Показано, что за это время, произошло увеличение приращения сейсмической интенсивности в среднем на +0.3 балла относительно первоначальных условий. Изменились соответственно и значения характеристик сейсмических воздействий (пиковые ускорения грунта PGA и величины спектров реакции Sa). Результаты исследований позволяют обосновано подходить к прогнозированию изменений сейсмической ситуаций на площадках СМР.

МИГРАЦИЯ ВЛАГИ В ОКОЛОСВАЙНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПОСЛЕ УСТАНОВКИ БУРООПУСКНЫХ СВАЙ

Набережный А.Д.[1], Турантаев Е.Е.[1,2], Саввина А.Е.[2], Егорова А.Д.[2]
[1] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
[2] Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск

Буроопускные сваи массово используются в строительстве на многолетнемерзлых грунтах с 60-х гг. прошлого столетия. По результатам исследований, проведенных ведущими отечественными учеными [1,2,3], было установлено, что на поверхности свай, после их погружения буроопускным способом в заполненные грунтовыми растворами скважины, в период максимального промерзания грунтов, образуется прослойка льда. Ими также указывается, что образующаяся пленка снижает прочность смерзания сваи с грунтовым раствором. Соответственно, при снижении прочности смерзания свай с грунтовым раствором, происходит общее снижение несущей способности оснований, образуются неравномерные деформации фундаментов в процессе строительства и эксплуатации. В связи с этим, исследования процессов миграции влаги, происходящие в околосвайном пространстве после установки свай буроопускным способом, имеют высокую актуальность.

Ранее проведенные нами исследования подтвердили наличие прослойки льда на поверхности сваи при погружении ее с начальной низкой отрицательной температурой в грунтовый раствор [4]. Для проведения этих исследований проведены лабораторные эксперименты в Подземной лаборатории Института мерзлотоведения. Экспериментальная установка представляла из себя пенополистирольную коробку, заполняемую пылеватым песком с влажностью 20% (рис.1).

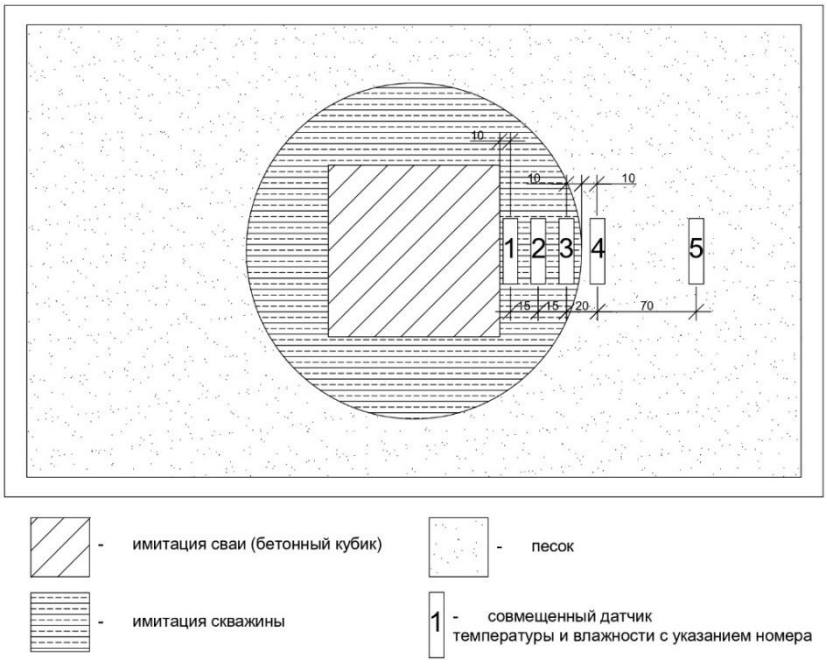


Рис.1. Общий вид экспериментальной установки

В середине коробки устраивалась имитация скважины, в которую после погружения модели сваи, имеющей начальную низкую отрицательную температуру (-25°С, -15°С), заливался грунтовый

раствор. Грунтовые растворы, примененные в эксперименте, имели различный состав. Были применены следующие варианты состава: цементно-песчаный с маркой М100 без добавок и аналогичный с добавлением ускорителя твердения (с отношением к количеству цемента 0,7%, 1,5% и 3%). В грунтовый раствор были установлены 3 совмещенных датчика температуры и влажности, в грунт – 2 датчика, данные от которых накапливались в логгере. Расположение датчиков приведено на рис.1.

По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что образование прослойки льда на поверхности сваи происходит в первые секунды после заливки грунтового раствора. В дальнейшем происходит растепление и водонасыщение мерзлого грунта, примыкающего к свае. При обратном промерзании грунта, примыкающего к свае, происходит отжатие влаги из этой области, что приводит к повышению влажности в грунтовом растворе. Применение добавок, снижающих температуру начала замерзания раствора, приводит к тому, что на поверхности сваи пленка не образуется. На заключительном этапе, в грунтовом растворе происходит общее снижение количества влаги в жидкой фазе, связанное с процессом промерзания раствора (в случае, когда применен раствор без добавок), либо с процессом твердения раствора (в случае, когда применен раствор с добавками).

1. Войтковский К.Ф. Фундаменты сооружений на мерзлых грунтах в Якутии/ Войтковский К.Ф., Мельников П.И., Порхаев Г.В., Вотяков И.Н., Гончаров Ю.М., Гречищев С.Е., Жигульский А.А., Кротов В.М., Лукин Г.О. - М.: Изд-во "Наука", 1968. - 198 с.
2. Волохов С.С. Влияние условий смораживания на прочность смерзания грунта с материалами при сдвиге // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 2003. - №6. - С.28-32.
3. Гончаров Ю.М. Разработка и совершенствование эффективных методов фундаментостроения на многолетнемерзлых грунтах. Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1989. - 42 с.
4. Набережный А.Д. Исследование несущей способности мерзлых грунтов основания ребристых буроопускных свай: дис. канд. техн. наук: 25.00.08 / Набережный Артем Дмитриевич. – Якутск, 2018. -149 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ НА БЕРЕГОВЫХ И ПОЙМЕННЫХ ТЕРРАСАХ

Пермяков П.П., Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Попов Г.Г.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия
permyakov2005@mail.ru

В последние десятилетия любое строительство линейных сооружений осложняется процессами глобального изменения климата и сопровождается нарушением естественных природных условий. В результате чего происходят различные негативные мерзлотные процессы: размыв, пучение, термокарст, просадка и деформации, что обуславливает необходимость разработки и применения нового системно-структурного подхода с учетом реального процесса промерзания-протаивания порового водно-солевого раствора грунта с образованием наледей. Анализ эксплуатации подводных газопроводов показывает, что причинами их отказов являются различные факторы, такие как внутреннее давление, недопустимый изгиб на неровностях рельефа дна, случайные динамические воздействия от проходящих судов, драг, резонансные колебания под действием потока при размывах дна, а в условиях криолитозоны – сезонное образование и оттаивание наледей [1-4]. Задача обеспечения их надежности и безопасности эксплуатации является приоритетной.

Береговые и пойменные террасы, как знакопеременные участки многолетней мерзлоты, являются особо опасными. Трасса подводного перехода магистрального газопровода (ППМГ) Павловск-Хатассы через р. Лена расположена в области распространения вечномерзлых грунтов мощностью более 250 м.

Широко применяемым методом контроля состояния подземного трубопровода являются измерения планово-высотных положений (ПВП). В результате измерений получают ПВП трубопровода в нескольких точках. Если трубопровод отклонился от прямолинейности, например, только в одном участке, то по точечным данным можно выяснить стрелу прогиба, оценив радиус изгиба и вычислить возникшее напряжение.

В условиях распространения многолетнемерзлых грунтов подземный трубопровод дважды в год меняет свое положение в моменты замерзания и оттаивания, и это вызывает сложную деформацию трубопровода [4]. Морозное пучение способно приводить к сильным изгибам трубопроводов, провисанию отдельных участков, перемещениям, иногда с потерей продольной устойчивости, могут возникнуть повышенное напряженно-деформированное состояние. Такие участки определяются расчетным путем, математическая модель приведена в работах [4,5].

Особое внимание было уделено участку левого склона берега, где наблюдаются сезонные экзогенные явления, такие как морозное пучение и оттаивание почвы, которые оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние магистрального трубопровода. Выбор данного участка связан с тем, что слой сезонного промерзания в этом месте пересекается с зоной вечномерзлых грунтов. Были получены методом ПВП данные пространственного положения двух ниток подземного трубопровода в ряд последовательных сезонов (апрель, ноябрь) на участках интенсивных деформаций.

При формировании зимнего влажностного поля важную роль играют осенние дожди, поэтому при промерзании грунта усиливается подтягивание незамерзшей воды к фронту промерзания. При этом образуется избыточное давление. За счет тепла, которое аккумулировалось в летние месяцы, в нижней части деятельного слоя грунта идет процесс протаивания. Суммарный эффект миграции грунтовых вод в результате двух вышеуказанных процессов приводит к образованию зоны повышенной влажности в осенне-зимний период. А также паводковая вода увлажняет грунт, т. е. зона повышенной влажности в прибрежной части расширилась (зона с изотермой 27%), а температурное поле понизилось (температурная изотерма имеет выпуклый вид, рис.).

Таким образом, установлен неравномерный характер распределения планово-высотных положений ППМГ на пойменных участках со стороны правого и левого берегов реки, что связано с неравномерностью пучения, процессами протаивания и промерзания грунтов, вследствие неоднородности состава грунтов, распределения влаги, плотности и условий промерзания.

Методом измерения планово-высотного положения газопровода на границе водного перехода, найдены участки со сложными деформациями. На их основе разработана математическая модель, объясняющая сдвиги трубопровода в многолетнемерзлых грунтах.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FWRS-2024-0035).

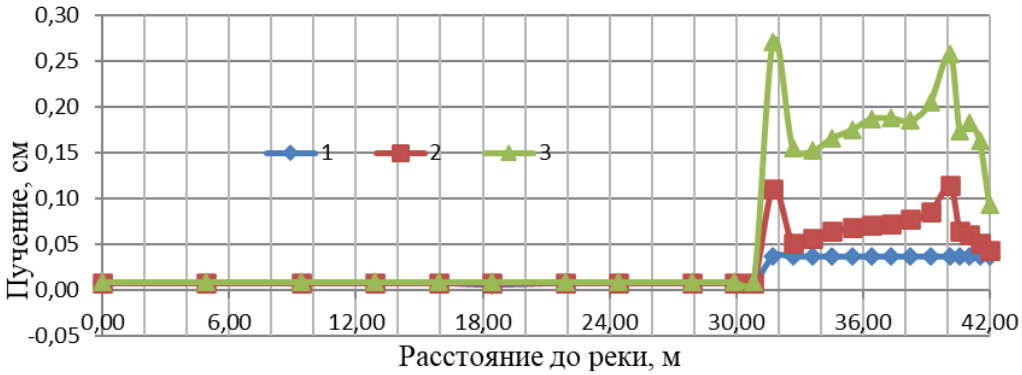


Рис. Динамика пучения грунта: 1 – начальное положение; 2 –сентябрь. 3 –апрель.

1. Идрисов Р.Б. Обеспечение надёжности и безопасности подводных переходов магистральных нефтепроводов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. ГУП «ИПТЭР», Уфа, 2002. – 332 с.

2. Дарзанов О.И. Определение степени безопасности подводных переходов газопроводов в сложных инженерно-геологических условиях // Записки Горного института, 2008. Т.178. С.43-46.

3. Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Грицук И.И., Масликова О.Я., Ионов Д.Н. Моделирование деформации русел, сложенных мерзлыми породами, при повышении температуры окружающей среды // Лед и снег. - 2013.- № 1 (121). - С. 104-111.

4. Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г., Антонов А.А. Исследование сложных деформаций подземного трубопровода в условиях вечной мерзлоты // XVIII Международная конференция "Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций": сб. материалов (Екатеринбург, 27-31 мая 2024 г.). - Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2024. - 230 с. - ISBN 978-5-6040873-4-3.- С. 150.

5. Пермяков П.П. Математическое моделирование негативных мерзлотных процессов. Новосибирск: Наука, 2023. – 163 с.

ПЕРСПЕКТИВА СОЗДАНИЯ ХРАНИЛИЩ МЕТАНА В ГАЗОГИДРАТНОЙ ФОРМЕ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Плетнева К.А., Жингель П., Молокитина Н.С.
Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень
nsmolokitina.ikz@yandex.ru

В Западно-Сибирском, Восточно-Сибирском мегабайссейнах, а также в арктических шельфовых бассейнах сосредоточены основные запасы природного газа Российской Федерации [1]. Важным этапом в ходе разработки углеводородных месторождений является транспортировка и хранение природного газа. На протяжении последних 40 лет в мире активно изучают возможность синтезировать газовые гидраты и варианты их применения в промышленности, одним из которых являются газогидратные технологии транспорта и хранения природного газа [2]. Данный вид технологии может позволить длительно хранить природный газ в сжатом отвержденном состоянии при атмосферном давлении.

Газовые гидраты – это клатратные соединения, в которых молекулы воды образуют решетки с полостями, заполняющимися молекулами газа при определенных термобарических условиях. Основной причиной активного изучения газогидратных технологий является открытие эффекта самоконсервации (существование зоны метастабильных газовых гидратов), который заключается в возможности длительного хранения газовых гидратов при атмосферном давлении за счет существенного снижения скорости разложения гидратов некоторых газов в условиях ниже равновесной кривой их существования при температурах от минус 75 до минус 5 °С, то есть в области стабильности льда [3]. Наиболее изучен эффект самоконсервации для гидратов метана.

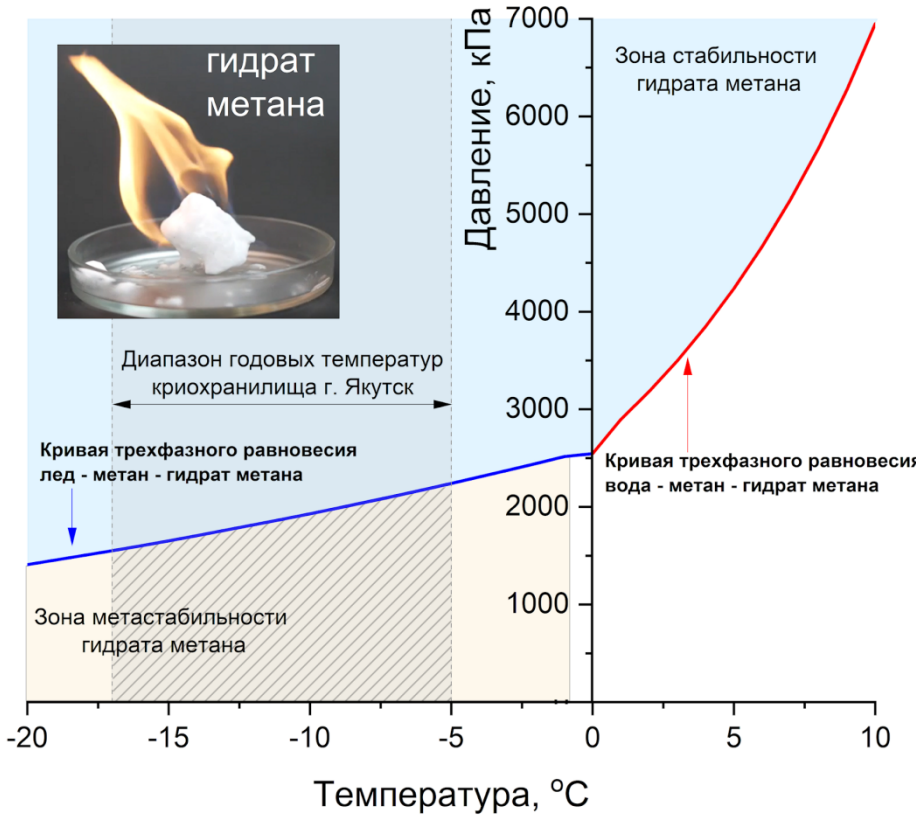


Рис. 1. Зоны существования гидратов метана в стабильном и метастабильном состоянии.

Опыт создания и использования криохранилищ в районах распространения многолетнемерзлых пород позволяет предположить, что создание природной холодильной камеры для хранения метана в твердой гидратной форме может быть основано на использовании естественного ресурса в качестве температурного режима грунтов криолитозоны. На рисунке 1 представлены зоны стабильного и метастабильного существования гидрата метана, а также область температур, представленных в работах группы ученых ИМЗ СО РАН об устройстве и температурном

режиме криохранилища в г. Якутск [4]. Исходя из данных, приведенных на рис. 1 очевидно, что диапазон годовых температур криохранилища г. Якутск находится в зоне метастабильного существования гидрата метана, что создает перспективу исследованиям, направленным на определение оптимальных температурных режимов и концептуальной схемы хранилища с целью реализации долгосрочного хранения метана в законсервированном гидратном состоянии.

Работа выполнена институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2024-0003).

1. Скоробогатов В.А. Крупнейшие, гигантские и уникальные осадочные бассейны мира и их роль в развитии газовой промышленности в XXI веке» опубликована в журнале / Neftegaz.RU, №10, 2018.

2. Семенов М.Е. и др. Текущее состояние и перспективы развития гидратной технологии хранения и транспортировки природного газа (обзор) / Петролеомика, т. 2, № 1, 2022.

3. Istomin V.A. et al. Self-preservation phenomenon of gas hydrate / Gas industry of Russia, № 4, 2006.

4. Кузьмин Г.П., Куваев В.А. Криохранилище семян растений в криолитозоне / Успехи современного естествознания, № 12, 2018.

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЙСОРАЗВЕДКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АТОМНОЙ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В ПОСЁЛКЕ УСТЬ-КУЙГА (РС (Я))

Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М., Гравис А.Г., Бабкин Е.М.,
Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия
mr_sadurtdinov@mail.ru

В зимние периоды 2021-2023 гг. вблизи пос. Усть-куйга (РС(Я)) проведены сейсмические исследования с целью изучения особенностей инженерно-геокриологического строения разреза и выбора приоритетной площадки строителства АЭС малой мощности. Основные задачи работ: подтверждение наличия/отсутствия предполагаемого тектонического нарушения в пределах площадки и прилегающих территориях; определение скоростного разреза упругих волн; изучение особенностей строения сейсмогеологического разреза; изучение геокриологического разреза.

Исследования выполнялись методами высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных SH-волнах (ВСПВ) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП) [1].

На рис. 1 приведены сейсмические данные ВСП, полученные в одной из скважитин.

На волновых записях уверенно выделяются прямые падающие волны несмотря на интеснывные помехи. В результате скважинных сейсмических исследований во всех скважинах были вычеслены значения средней и интервальной скоростей продольных (**Vp**) и поперечных (**Vs**) SH-волн, а также отношения скоростей **Vs/Vp и** значение коэффициента Пуассона **μ** [2].

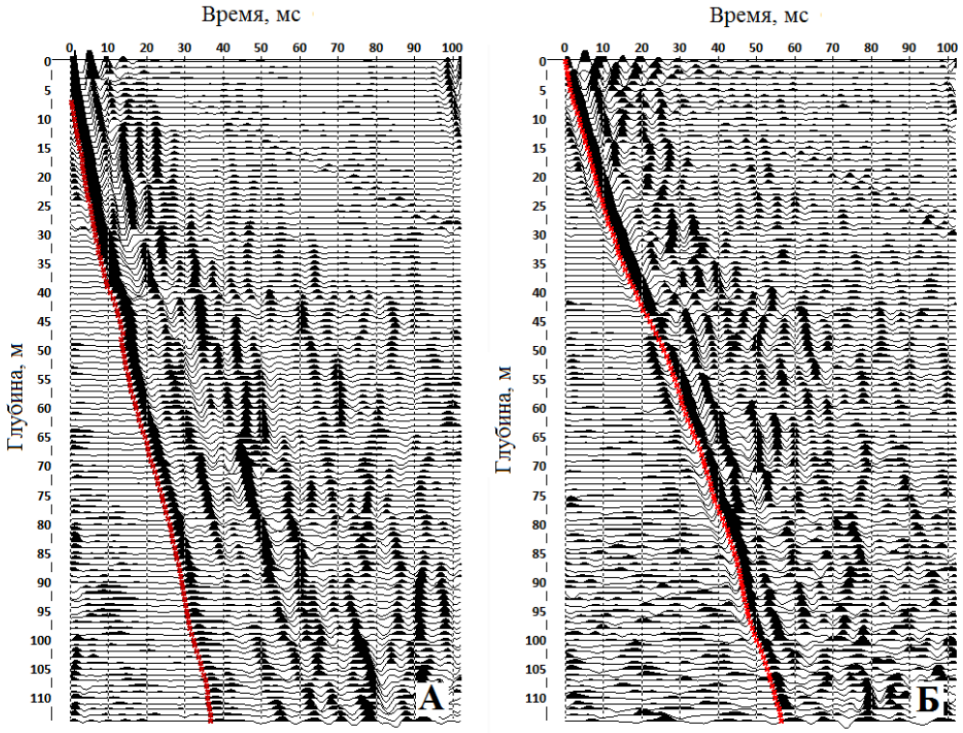


Рис. 1. Сейсмические записи продольных (А) и поперечных SH-волн (Б) в скважине при продольном ВСП, полученные в одной из скважин на площадке проектируемой АЭС.

По значениям **Vs/Vp** и/или **μ** можно определить степень разрушенности (нарушение сплошности) горного массива/грунтов (предельные значения **Vs/Vp –** 0-0,7, **μ –** 0-0,5). В данном случае интервалы с запредельными значениями этих характеристик наблюдаются на глубинах 55–75 м и 85 – 100 м.

На рис.2 приведен глубинный геолого-геофизический разрез по одному из профилей в пределах площадки проектируемой АЭС.

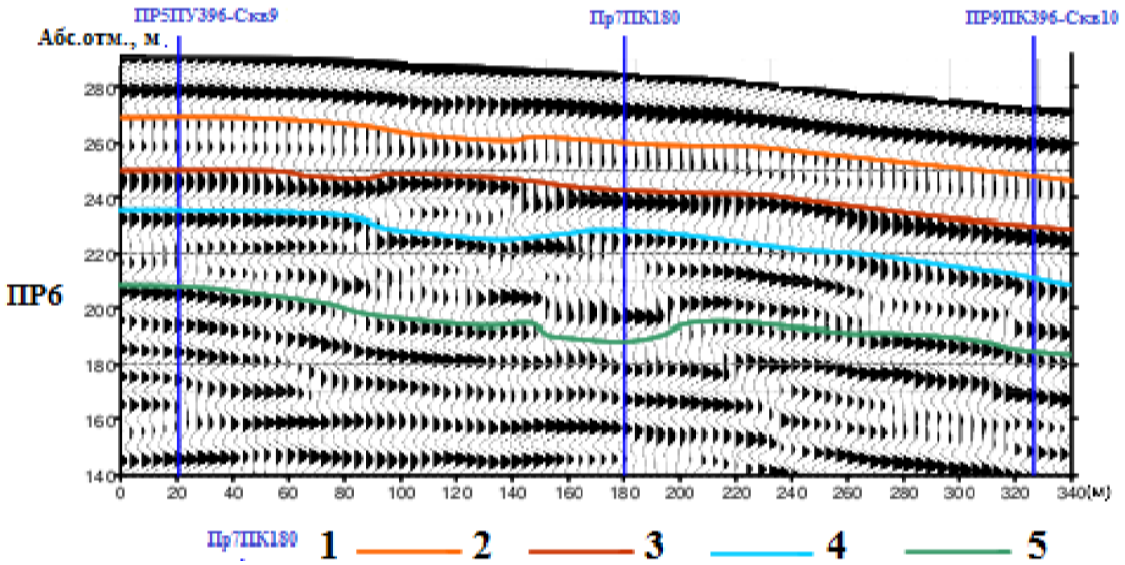


Рис. 2. Глубинный разрез по профилю 6 с геолого-геофизической интерпретацией

1 – пересечение сейсмических профилей, положение скважин на линии профиля и ее номер, 2 – подошва ИГЭ 6А, 3 – ИГЭ 7А), 4 – ИГЭ 7А, 5 – ИГЭ 7Б.

Здесь (как и на других профилях) выделяется ряд отраженных волн, которые, с учетом результатов скважинных исследований, уверенно идентифицируются с выделенными по данным бурения границами ряда инженерно-геологических элементов (ИГЭ) – подошвой ИГЭ 6А (16 м), 3 – ИГЭ 7А (48-49 м), 4 – ИГЭ 7А (53 -57 м), 5 – ИГЭ 7Б (92-99 м). Ниже в разрезе выделяется еще ряд достаточно контрастных и выдержанных сейсмогеологических границ. Однако уверенная их идентификация не представляется возможной без дополнительной геологической информации.

По результатам сейсмческих исследований: выявлены особенности строения коры выветривания; выделены два структурных комплекса (граница между ними залегает на глубине 50-60м). В нижнем выделяены структурные геологические неоднородностии, предположительно связанные с тектоническими нарушениями. На дневной поверхности и в верхнем структурном комплексе они проявляются, как правило, на участках с увеличенной мощностью коры выветривания; в пределах площадки разрез до глубины 120м является выдержанным с квазигоризонтальным или слабонаклонном залеганием сейсмогеологических границ.

Часть исследований выполнены в рамках госзадания ИКЗ ТюмНЦ СО РАН № FWRZ-2021-0005.

1. Скворцов А.Г. Высокоразрешающая сейсморазведка на поперечных волнах при изучении верхней части геологической среды – Инженерная геофизика, 2005. – МГУ, Геленджик, 2005.- с.16-18

2. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидрогеол. и инж. геол. Под ред., Н.Н Горяинова. - М.: Недра, 1992, - 264 с. ил.

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СООРУЖЕНИЙНА МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Синицкий А.И.[1], Шеин А.Н.[1], Башкова А.А.[1], Ребенков В.Ф.[1], Громадский А.Н.[1], Кулешов А.П.[2], Новгородова М.А.[2]

[1] ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», г. Салехард

[2] ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ), г. Москва

geolosoph@gmail.com

В последнее годы отмечается рост аварийности гражданской и промышленной инфраструктуры, особенно в районах со сложными инженерно-геологическими условиями, в частности на территориях, где распространены многолетнемёрзлые породы.

При эксплуатации инженерных объектов на многолетнемёрзлых грунтах (далее – ММГ) часто наблюдается ситуация, когда в здание было вложено немало средств: проводились текущие ремонты, утепление и облицовка фасада, установка систем термостабилизации грунтов, обустройство дренажной системы и др. Однако, несмотря на эти усилия, здание в конечном итоге было снесено.

Как отмечает Д.С. Паздерин (2018 г.), периодическое привлечение к региональным наблюдениям за вечной мерзлотой сторонних организаций не позволяет определить степень опасности измеренных аномалий температурного поля грунтов оснований и планово-высотных положений. Это зачастую объясняется отсутствием у разово привлечённых изыскателей полного пакета геологической информации по объектам мониторинга, исторически накопленных данных по термометрии грунтов, а иногда и просто мотивации. Спросить с «временщиков» в долгосрочной перспективе зачастую просто невозможно.

Таким образом, очевидна необходимость в оценке работоспособности и технического состояния арктической инфраструктуры собственными силами и средствами. Необходимо контролировать на протяжении всего жизненного цикла объекта появляющиеся нарушения требований проекта или норм в конкретных условиях эксплуатации (появление трещин в здании, просадок грунтов, повышение их температуры и др.).

Основные проблемные вопросы, связанные с эксплуатацией городской инфраструктуры, с которыми сталкиваются сегодня специализированные службы, это:

- протечки во всех видах коммуникаций инженерных объектов;
- скопление на придомовой территории дождевых и талых вод, связанное со слабым оборудованием систем по их сбору и отведению;
- несанкционированное складирование снега;
- отсутствие должной вентиляции технического подполья, его частое захламление;
- нарушение условий вентилирования и др.

В связи с этим, на протяжении всего жизненного цикла инженерного объекта важно соблюдать обязательное выполнение всех требований к эксплуатации оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах, которые прописаны в Главе 6 СП 497.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила эксплуатации».

Понимая важность геотехнического мониторинга зданий и сооружений в процессе их эксплуатации, ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (далее – Научный центр) совместно с профильными научными и производственными организациями стал инициатором создания следующих региональных документов:

- Инструкция «Геотехнический мониторинг при строительстве и эксплуатации сооружений на многолетнемерзлых грунтах»;
- Методика «Разработка положений методических рекомендаций по тепловизионной диагностике систем и устройств температурной стабилизации грунтов».

Данная методика должна стать основой для разработки нормативного документа, свода правил «Здания и сооружения. Правила обследования систем термостабилизации грунта». Так, в СП 25.13330.2020, таблица М.2 «Периодичность проведения измерений контролируемых параметров в период строительства и реконструкции сооружений», указано, что одним из контролируемых параметров является «Температура охлаждающих устройств», но как выполнять этот вид работ в действующих нормах не отражено.

Специалисты научного центра регулярно выполняют геотехнический осмотр проветриваемых подполий и зданий в населённых пунктах Ямало-Ненецкого автономного округа (г. Салехард, Лабытнанги, п. Аксарка и др.).

В ходе осмотров производятся замеры в термометрических и гидрогеологических скважинах, оценивается работа сезонно-действующих охлаждающих устройств, ведутся наблюдения за деформациями сооружений. На основе полученной полевой информации выполняется оценка технического состояния зданий, фиксируются текущее состояние инженерно-геологических условий в первую очередь социальных объектов городской инфраструктуры.

Важно помнить, что процессы создания и функционирования сооружений методологически увязываются в звенья единой цепи: изыскания – проектирование – строительство – эксплуатация, путем управления качеством природно-технических систем на всех стадиях.

Рисунок. Геотехнический осмотр проветриваемого подполья здания, г. Салехард, март 2025 г.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Сотникова К.С. [1,2], **Маслаков А.А.** [1]
[1] *МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва*
[2] *НТЦ «Симмэйкерс»*
ks.sotnikova@geogr.msu.ru

Развитие железнодорожного транспорта является одним из приоритетных направлений Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Регионы, где строятся новые магистрали, находятся в зоне распространения многолетнемерзлых пород, что значительно влияет на принципы хозяйственного освоения и строительства. В настоящее время специалисты ищут способы минимизировать проблемы при строительстве и эксплуатации железных дорог в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Для регламентирования работ на подобных основаниях при проектировании данного вида транспорта используется Свод Правил 447.1325800.2019 «Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования». В приложении данного документа изложена методика подготовки исходных данных для расчетов по прогнозированию температурного режима грунтов оснований после постройки сооружений, в том числе указано о необходимости учета прихода солнечной радиации на поверхность с учетом ориентации ее склона. Однако в методике расчетов экспозиция склонов насыпи не учитывается, а принимается универсальная поправка 3ºС для любой поверхностей откоса. Подобное обобщение может сказаться на достоверности прогноза геокриологических условий.

В работе была собрана база данных по климату и геологическому строению грунтов для 13-потенциальных транспортных узлов, на основе которой рассчитывались поправки температуры на солнечную радиацию на проектируемых железнодорожных насыпях по методике СП 447.1325800.2019 [1] и альтернативной методике Л.Н. Хрусталева [2]. Рассчитанные температурные поправки сравнивались между собой и использовались для корректного прогнозного моделирования железнодорожной насыпи в изучаемых пунктах. Для исследования была выбрана универсальная железнодорожная насыпь для всех пунктов для исключения искажений из-за различий в материалах и форме. Для создания прототипа железнодорожных насыпей использовалось программное обеспечение Frost 3D 2025 (frost3d.ru). Программный комплекс позволяет проводить численное моделирование процессов теплопередачи в вечной мерзлоте с учетом антропогенного теплового воздействия и изменений климата.

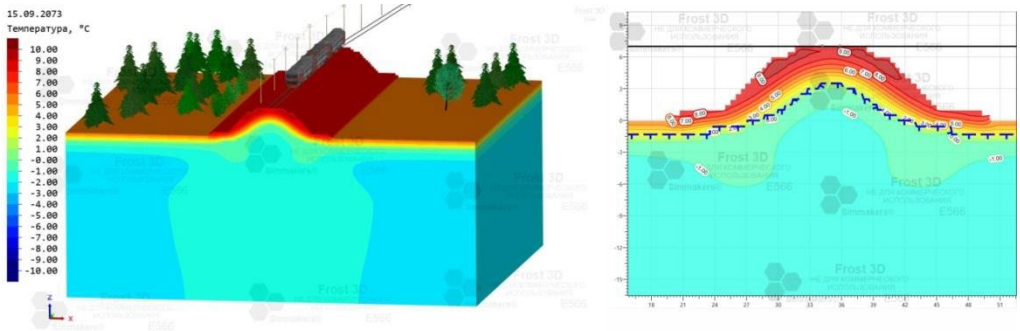


Рис.1. Пример модели железнодорожной насыпи в программном комплексе «Frost 3D» с профилем температурного поля.

Проведенное исследование подтвердило в ходе подготовки материалов отсутствие учета ориентации откосов к сторонам света в методике документации для проектирования железных дорог в криолитозоне России СП 447.1325800.2019. Более достоверно поступление солнечной радиации в зависимости от экспозиции склона рассматривается в расчетах Л.Н. Хрусталев.

Расчеты по СП 447 при сравнении с методикой Л.Н. Хрусталева наиболее совпадают с поправками для склона северной экспозиции для месяцев переходных сезонов (около 3 ºС). В остальных случаях и для южных откосов значения поправок различаются до 25,9 ºС. Максимальная поправка составила 28,9 ºС для Эльги для склона южной экспозиции в августе.

Процент расхождения вклада солнечной радиации в мощность сезонно-талого слоя по методике СП 447 и Л.Н. Хрусталева для моделирования железнодорожной насыпи на период 50 лет составил от -35,2 до 22,1% для северного откоса и от 15,4 до 41,5% для южного. Для большинства пунктов разница не установлена из-за таликовой зоны в теле насыпи. Таким образом, по методике

СП 447 в большинстве случае происходит недоучет проникающего тепла из-за отсутствия корректных поправок на солнечную радиацию в разных пунктах криолитозоны из-за использования универсальной поправки. Разница глубины протаивания сезонно-талого слоя насыпи при моделировании железнодорожной насыпи на 50-летний период между откосами разной экспозиции составила от 15,4 до 69,6 %.

По результатам исследования взаимосвязи в изменении температурных поправок и мощности сезонно-талого слоя при моделировании на 50-летний период с годовой амплитуды температуры воздуха и широты исследуемого пункта выявлено не было.

1. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования / Минстрой России. – Официальное издание. Москва: Стандартинформ, 2019. – 36 с.

2. Хрусталев Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне: Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Геология" и специальности "Гидрогеология и инженерная геология" / Л. Н. Хрусталев. – М.: Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2019. 543 с.

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НА ФЕДЕРАЛЬНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГЕ «ВИЛЮЙ» В РЕСПУБЛИКЕ САХА (ЯКУТИЯ)

Сыромятников И.И., Литовко А.В., Кириллин А.Р., Шапошников Г.И.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
igor@mpi.ysn.ru

В современном мире автомобильные дороги являются одним из важнейших элементов инфраструктуры, которые имеют значительное влияние на развитие и жизнедеятельность любого региона страны. В настоящее время в северных и арктических регионах безопасная эксплуатация автомобильных дорог осложняется деформациями земляного полотна по причине деградации мерзлых грунтов основания и активизации опасных криогенных процессов в связи с потеплением климата. Как показывает опыт, в области распространения многолетнемерзлых грунтов деформации на автомобильных дорогах в основном проявляются в виде просадок и пучений земляного полотна, морозобойного растрескивания дорожной одежды, а также разрушений откосов под действием термоденудации.

Для выяснения причин возникновения этих явлений необходимы специальные исследования и на их основе разработка научно-обоснованных рекомендаций по предотвращению деформаций. Одним из методов проведения специальных исследований считается организация системы контроля за состоянием автомобильных дорог и дорожных конструкций. В рамках организации такой системы наиболее эффективным способом является создание постов геотехнического мониторинга на участках трассы автодороги с различными мерзлотно-ландшафтными условиями. Геотехнический мониторинг (ГТМ) – это система комплексного контроля, прогнозирования и управления состоянием природно-техногенных систем с целью обеспечения эксплуатационной надежности на всех стадиях жизненного цикла. Анализ информации, получаемой с постов ГТМ на автодорогах, позволит оценить динамику состояния мерзлотно-грунтовых условий, выявить опасные криогенные процессы на ранней стадии их развития, а также своевременно разработать и применить превентивные мероприятия для сохранения устойчивого состояния автомобильных дорог.

Создание системы геотехнического мониторинга линейных инженерных сооружений большой протяженности необходимо начинать с мерзлотно-климатического и инженерно-геокриологического районирования территории прохождения их трассы. В результате районирования составляются разномасштабные карты и схемы, включающие различные мерзлотно-грунтовые условия территории прохождения автомобильных дорог. В выделенных районах отмечаются ключевые участки с наиболее типичными природно-техногенными комплексами для организации мониторинга на их территории.

На площадке геотехнического мониторинга устанавливаются контрольно-измерительные оборудования и приборы для регистрации, накапливании и передачи данных о состоянии и темпах изменения климатических и инженерно-геокриологических условий. Ключевыми параметрами наблюдения на таком посту являются: температурный и влажностный режим грунтов, условия теплообмена, гидрогеологические и метеорологические наблюдения, деформации дорожного полотна и насыпи, а также динамика развития криогенных процессов на автодороге и полосе отвода.

Федеральная автомобильная дорога А-331 «Вилюй» относится к IV категории и проходит по территории Республики Саха (Якутия) и Иркутской области. Протяженность автодороги от г. Якутска до г. Тулун составляет 2146 км.

В 2023 году в рамках реализации проекта по организации геотехнического мониторинга на федеральных автомобильных дорогах в криолитозоне были установлены 2 поста наблюдения за комплексными метеорологическими и мерзлотными условиями на автодороге «Вилюй».

В результате этих работ получены детальные характеристики изменения температурного режима грунтов (срочные, среднесуточные, декадные, среднемесячные, среднегодовая) для разных элементов конструкции автомобильной дороги. Данные свидетельствуют о значительных различиях температурного режима не только под автодорогой и полосой отвода, но и под откосами разной экспозиции. Например, данные поста на 75 км автомобильной дороги А-331 «Вилюй» показывают, что значение ⊗T в течение 2023 года между противоположными откосами на глубине 1 м изменяется от 0,1 до 4,3°С. Наибольшее значение разницы температур наблюдается в феврале. С глубиной величина ⊗T снижается и на 10 м варьирует от 0 до 0,2°С. Эти параметры определяют температурный градиент в грунтах насыпи и её основания, что определяет механизм подтока (влагонасыщения) в сезонноталом слое и в основание полотна дороги.

Также выявлено, что на формирование температурного режима грунтов основания автодороги существенное влияние оказывает снежный покров. Регулярная уборка снега с поверхности асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги способствует интенсивному промерзанию

земляного полотна и, в зависимости от количества зимних атмосферных осадков, определяет особенности формирования термовлажностного режима грунтов на откосах и в основании насыпи.

Впервые получены данные о плотности теплового потока вблизи поверхности (глубина 15 см), величина которого изменяется в пределах мониторингового профиля от +120 до –68 Вт/м^2. Значительны колебания теплового потока и в суточном режиме. Установлено, что в зимний период предельные значения плотности теплового потока отличаются почти в 2 раза. Зная и управляя распределением тепловых потоков (используя подбор грунтов по теплофизическим свойствам) возможно добиться охлаждающего эффекта грунтов полотна автодороги. Детальный анализ распределения теплового потока позволит разработать эффективные решения конструкции земляного полотна автодороги, для конкретных условий.

Полученные региональные данные по формированию температурного режима грунтов в полосе прохождения автомобильной дороги, позволят повысить достоверность прогноза инженерно-геокриологических условий в процессе эксплуатации и подбирать наиболее эффективные проектные решения конструкции насыпи автомобильных дорог, для обеспечения их устойчивости с учетом возможных с климатических изменений.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕЧНЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРОДУКТОПРОВОДОВ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Христофоров И.И.[1], Горохов И.В.[1,2], Данилов К.П.[1], Омельяненко П.А.[1]
[1] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
[2] Якутский научный центр СО РАН, Якутск
khristoforov@mpi.ysn.ru

Большинство пресноводных водоемов в зоне сплошного распространения криолитозоны покрыты льдом более 6 месяцев в году, при этом толщина льда в них может превышать 2 метра. Технические и ремонтные работы на речных переходах магистральных нефте- и газопроводов, пересекающих глубоководные реки и озера, проводятся в зимний период при достаточной толщине льда для выхода техники на лед. Для уточнения участка работ, а также точного местоположения продуктопровода, находящегося в донных отложениях, необходимо применять геофизические методы, в частности, метод георадиолокации. Данный метод хорошо себя зарекомендовал при работе с поверхности воды с помощью различных плавательных средств, но при зондировании в зимний период с поверхности снега и льда возникают трудности, вызванные различными сигналами-помехами, а также уменьшением глубинности исследования.

Экспериментальные работы проведены на речном переходе действующего магистрального газопровода в районе п. Хатассы, на ключевых участках в русле р. Лена, технологической протоке и Хаптагайской протоке. Методические эксперименты для разработки методики зондирования базировались на использовании георадиолокационной аппаратуры с широкополосными приемо-передающими антеннами для генерирования и последующей регистрации электромагнитных импульсов, распространенных через модельные среды с различными электрофизическими свойствами. На речном переходе магистрального газопровода проведены экспериментальны работы с помощью трех видов антенн: АБ 150 МГц АБ 250 МГц и АБ 400 МГц. В зимнее время георадарные профиля проведены с полностью расчищенного от снега поверхности, со льда с естественным снежным покровом, рыхлый не утоптанный снег для зондирования с воздуха (на разной высоте) при помощи изготовленной платформы для крепления на разных высотах антенны георадара.

В результате проведенных экспериментальных исследований разработана методика георадиолокационного зондирования донных отложений эксплуатируемых линейных инженерных сооружений, на примере действующего магистрального газопровода. В обработке георадарных сигналов, полученных с поверхности льда, кроме стандартных процедур усиления и обрезания сигналов, используется процедуры «частотной фильтрации» для фильтрации высокочастотных помех от трещин льда и процедура «вычитание среднего» при одинаковой мощности речного льда для уменьшения его влияния и увеличения контрастности сигналов от газопровода. Следует отметить, что не используется процедура расчёта диэлектрической проницаемости по локальной неоднородности (продуктопроводу), так как в методике георадиолокации газопровод пересекается под углом, что сильно изменяет угол раскрыва усов гиперболы на радарограмме и дает ошибочные показатели диэлектрической проницаемости грунтов до трубопровода.

Поперечными газопроводу георадарными профилями построено линейное представление положения газопровода на участке протоки р. Лена. Одним из особенностей методики зондирования газопровода с поверхности снега и льда является возможность продольного георадарного профилирования ровно над осью газопровода. Это возможно после выявления его положения поперечными профилями. С помощью разработанной методики с использованием оснастки по повышения высоты положения антенн получилось обнаружить положение газопровода по всем профилям, что дало возможность оценить смещение продуктопровода в плане от оси створа газопровода.

Методика апробирована на нескольких площадках, в том числе на действующем магистральном газопроводе, и показала свою эффективность по уменьшению помех на радараграммах при наличии большого количества трещин, лунок и ремонтных майн в ледяном покрове над объектом исследования. В результате, повышается глубинность и разрешающая способность георадиолокационного зондирования донных отложений рек и озер, а также при поиске и обследовании подводных локальных объектов, в том числе линейных инженерных сооружений.

Разработанная платформа для антенного устройства георадара и способ георадиолокационного исследования подводных объектов повышает эффективность георадиолокационного зондирования донных отложений речных переходов линейных инженерных сооружений в зимний период.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Чувилин Е.М., Буханов Б.А., Семенова Т.И.[1] Соколова Н.С., Волкова О.А., Бурухин А.А., Орлов Д.М.
Сколковский институт науки и технологий, Москва
e.chuvilin@skoltech.ru

Исследование строения и взаимосвязи структурных элементов мерзлых грунтов является фундаментальной научной проблемой в геокриологии, имеющей практическое значение, прежде всего при оценке инженерных свойств мерзлых грунтов и их поведения при взаимодействии с различными геотехническими сооружениями. В связи с происходящими в настоящее время климатическими изменениями, которые влияют на физические, механические и тепловые свойства многолетнемерзлых грунтов, особенно в районах, подверженных высоким техногенным нагрузкам в связи с их активным хозяйственным освоением, прогноз свойств и поведения мерзлых грунтов имеет первостепенное значение. Учитывая, что определяющими факторами формирования свойств мерзлых грунтов является их структура и компонентный состав, возникает необходимость проведения специальных структурных исследований грунтов с использованием современных технологий. Применение современных высокотехнологичных методов исследования, к которым относится рентгеновская микротомография, открывает новые возможности для количественного описания структуры мерзлого грунта и создания его цифровой модели, которая позволит прогнозировать свойства и поведение мерзлоты как в ходе ее естественной эволюции, так и при различных видах техногенного воздействия. В этой связи разработка методик исследований льдосодержащих грунтовых сред с помощью рентгеновской микротомографии представляет собой важнейший этап на пути к созданию цифровых моделей мерзлых пород.

В ходе анализа имеющихся разработок в области применения рентгеновской микротомографии для структурно-текстурных исследований мерзлых грунтов был предложен алгоритм методических работ на основе использования микрофокусной компьютерной томографической системы высокого разрешения Phoenix v|tome|x L240. Данная система в силу технических характеристик позволяет проводить исследования на грунтовых образцах диаметром от нескольких миллиметров до полноразмерного керна. Эти исследования включали следующие этапы: подготовку образца необходимого размера, размещение мерзлого образца в термостатирующую криокамеру, установку криокамеры с мерзлым образцом в рентгеновский томограф, проведение микротомографического сканирования и обработку полученных данных с помощью специальных программ. Инструменты, которые использовались для обработки изображений, позволяют работать в широком спектре выбора функций, улучшающих изображение для анализа порового пространства и органоминерального вещества.

Предложенный алгоритм был отработан на модельных искусственно промороженных грунтовых образцах песчаного и песчано-глинистого состава, а также на образцах кернов мерзлых грунтов, отобранных из верхних горизонтов ММП. В результате методических исследований была разработана процедура разномасштабного анализа структурно-текстурных особенностей мерзлого грунта по данным рентгенотомографических изображений. Количественная обработка полученных микротомографических изображений позволила создать 2D модель исследуемых грунтовых образцов, на которой можно проследить распределение минерального скелета, льда и воздуха. По полученным в ходе обработки рентгеновских изображений данным была затем построена цифровая модель образца мерзлого песка, а также его ледяной и воздушных компонент (Рис. 1).

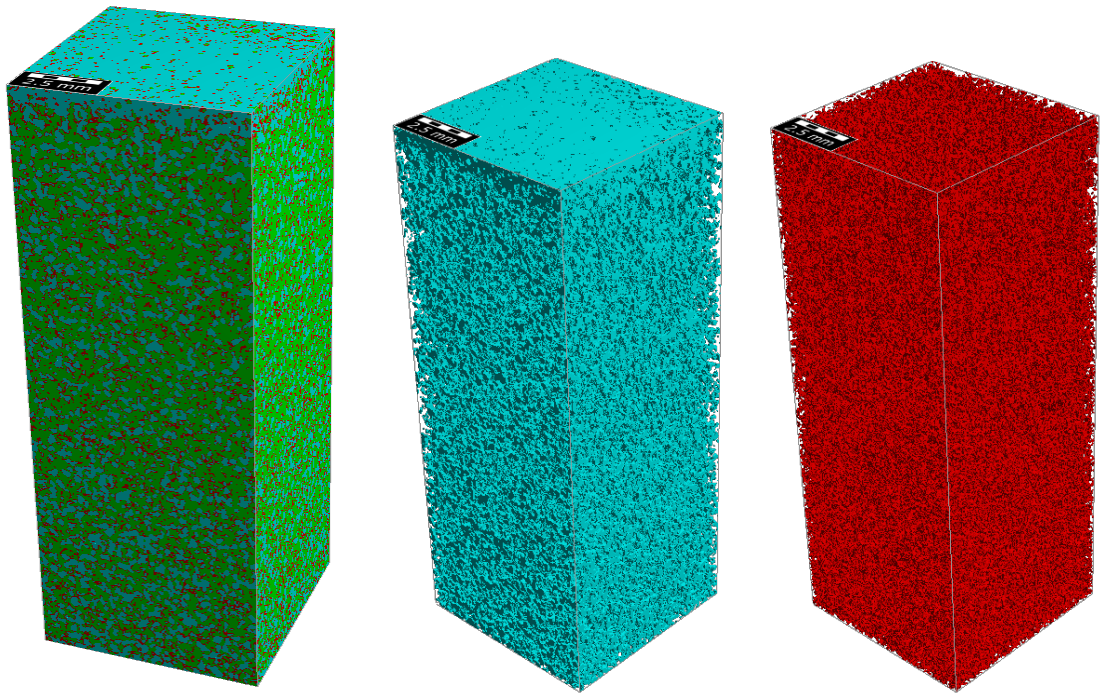


Рис. 1. Цифровая модель образца мерзлого кварцевого песка (W=18%, плотность скелета грунта 1,46 г/см^3). Цвет основных компонентов: зеленый − минеральный скелет, голубой − лед, красный – воздух (газ). Пористость – 0,44, степень заполнения пор – 0,66, льдистость – 28,9 %.

В целом разработка концепции цифровой модели мерзлого грунта базируется на специальной методике обработки данных компьютерной рентгеновской микротомографии (μCT). Применение этой методики позволяет непосредственно переходить к построению цифровой модели мерзлого грунта, которая может количественно описать пространственное распределение основных компонентов мерзлого грунта: минерального скелета, льда и газа. С помощью цифровой модели появляется возможность зафиксировать на количественном уровне объёмную структуру мерзлого грунта, а также оценить влияние распределения различных элементов (органоминерального скелета, льда незамерзшей воды и газа) на его свойства и поведение. Применение цифрового моделирования позволяет сохранять модельный двойник мерзлого грунта бесконечно долгое время в исходном неизменённом виде и использовать его в дальнейшем при анализе возможных трансформаций, вызванных различными природными и техногенными воздействиями. Использование цифрового керна имеет большой потенциал для повышения производительности и качества проведения инженерных изысканий применительно к высокольдистым и высокотемпературным мерзлым грунтам. Для дальнейшего развития разрабатываемой концепции цифровой модели мерзлых грунтов предлагается применять к ним более детальные рентгеномикротомографические исследования, что позволит увеличить разрешение рентгеновских изображений и количественно охарактеризовать тонкодисперсную составляющую мерзлой грунтовой системы.

Авторы выражают благодарность администрации ЯНАО за поддержку исследований по разработке концепции цифровой модели мерзлого керна для многолетнемерзлых грунтов.

ВОДНО-ПОТЕНЦИАЛОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАЧАЛА ЗАМЕРЗАНИЯ ПОРОД И СОДЕРЖАНИЯ В НИХ НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ

Чувилин Е.М.[1], Буханов Б.А.[1], Соколова Н.С.[1], Истомин В.А.[2]
[1] Сколковский институт науки и технологий, Москва
[2] ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург
e.chuvilin@skoltech.ru

Температура начала замерзания (оттаивания) грунтов и содержание в них незамерзшей воды являются важными характеристиками, что вызывает необходимость их экспериментального определения при проведении различных мерзлотно-геологических исследований и инженерных изысканий. Однако стандартная методика экспериментального измерения температуры начала замерзания грунтов и многие методы определения содержания незамерзшей воды отличаются значительной трудоемкостью, энергозатратностью и длительностью. Поэтому применение различных косвенных методов и подходов для оперативного определения этих важнейших инженерных характеристик мерзлых грунтов, использующих пересчет через измеряемые при положительной температуре другие грунтовые параметры, является в настоящее время крайне актуальным и востребованным направлением.

Разработанный авторами водно-потенциометрический метод определения температуры начала замерзания мерзлых грунтов по единичному измерению потенциала поровой воды с последующим термодинамическим пересчетом на значение эквивалентной температуры (т.е. температуры начала замерзания), а также определения количества незамерзшей воды на основе измерения потенциала (или активности) поровой воды при ступенчатом понижении влажности образца, является одним из наиболее перспективных экспериментально-расчетных методов [1-4]. Этот подход показал высокую производительность и точность измеряемых параметров, сопоставимую с другими экспериментальными методами. Для проведения этих работ предлагается использование серийных приборов типа WP4, которые могут проводить все необходимые измерения при комнатной температуре за достаточно короткий интервал времени (до 30 минут на один замер). При этом полностью отсутствует необходимость в использовании дополнительного холодильного оборудования.

Результаты определения температуры начала замерзания и содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах, полученных водно-потенциометрическим методом, показывают хорошую сходимость с результатами, полученными другими методами, которые в настоящее время широко используются при решении научных и практических задач [2-4]. Различие при определении температуры начала замерзания водно-потенциометрическим методом и прямым измерением температуры для всех рассмотренных грунтов составляет не более 0,05°С, что дает возможность рекомендовать водно-потенциометрический метод для определения температуры начала замерзания природных грунтов наравне с методами прямого экспериментального определения. Проведенное сравнение водно-потенциометрического метода с другими методами (контактным методом и методом ЯМР) для определения фазового состава воды в мерзлых грунтах показывало хорошую согласованность как в области высоких (~ -1°С), так и низких отрицательных температур (до -15°С) [2,4].

Водно-потенциометрический метод может быть использован для определения количества незамерзшей воды в грунтах различного состава и генезиса. Этот метод хорошо себя зарекомендовал при работе с природными торфосодержащими грунтами (Рис. 1), определение фазового состава воды в которых вызывает существенные методические сложности при применении других методов определения влажности за счет незамерзшей воды.

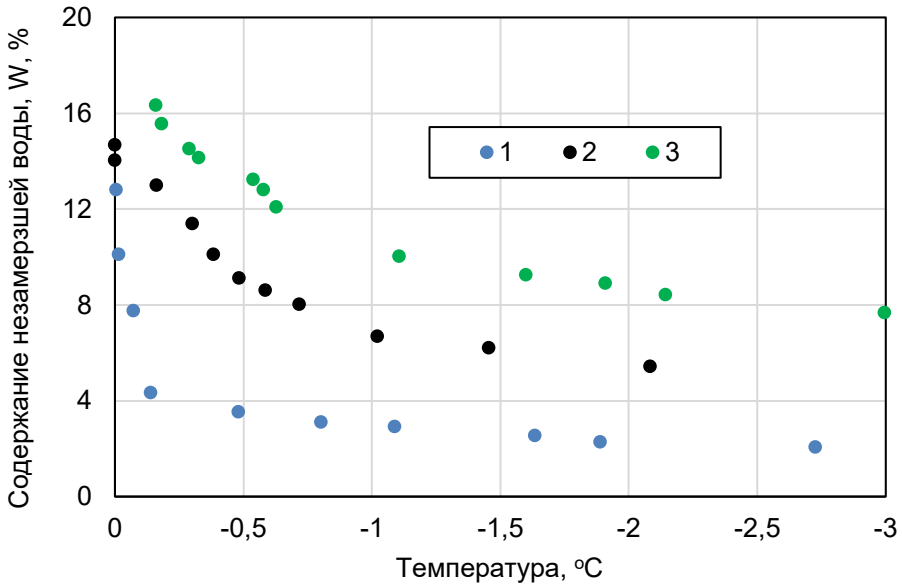


Рис. 1. Изменение содержания незамерзшей воды в области высоких отрицательных температур (до -3°C) в супесчано-суглинистых грунтах (г. Салехард) с различным содержанием органического вещества (*Ir*): 1- 0,94%, 2 – 1,76%, 3 – 5,51%.

Еще одним преимуществом данного метода является возможность получения детальных характеристик изменения содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах в области высоких (выше -3°C) отрицательных температуры (Рис. 1), что важно при исследовании пород криолитозоны в условиях их деградации при климатических изменениях.

1. Истомин В.А., Чувилин Е.М., Буханов Б.А. Ускоренный метод оценки содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах. Криосфера Земли, 2017, т. XXI, №. 6, с. 134-139.

2. Чувилин Е.М., Соколова Н. С., Буханов Б.А. и др. Применение водно- потенциометрического метода для определения содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах различного состава. Криосфера Земли, 2020, т. 24, № 5, с. 16-28.

3. Чувилин Е.М., Соколова Н.С., Буханов Б.А. и др. Определение температуры начала замерзания грунтов на основе измерения потенциала поровой воды. Криосфера Земли, 2020, т. 24, № 6, с.11-20.

4. Chuvilin E. M., Bukhanov B. A., Mukhametdinova A. Z. et al. Freezing point and unfrozen water contents of permafrost soils: Estimation by the water potential method. Cold Regions Science and Technology, 2022, vol 196, 103488.

ПЕРСПЕКТИВЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЗОННО ДЕЙСТВУЮЩИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПРИ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРЕНДАХ НА ПРИМЕРЕ Г. САЛЕХАРД

Шеин А.Н.[1], Синицкий А.И.[1], Башкова А.А.[1,2]
[1]Научный центр изучения Арктики, г. Салехард
[2]Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень
A.N.Shein@yandex.ru

Мерзлота занимает значительную (60-65%) часть территории РФ, которая продолжает активно развиваться. Помимо труднодоступности северных территорий, мёрзлые породы осложняют их освоение из-за возникающих проблем при возведении и дальнейшей эксплуатации инфраструктуры в таких условиях (Шеин, 2020). Проблемы возникают не только из-за сложного строения пород, но и ускорившихся в последнее время процессов деградации мерзлоты ввиду потепления климата. При строительстве сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) по I принципу (с сохранением основания в мерзлом состоянии) широкое распространение получили методы термостабилизации грунтов (ТСГ). Основным способом обеспечения требуемого температурного режима фундамента для сохранения мерзлого состояния грунтов является сооружение проветриваемого (вентилируемого) подполья (ПП) и применении сезонно действующих охлаждающих устройств (СОУ). Среди различных типов таких устройств наиболее часто в ПП используются вертикальные двухфазные естественно-конвективные устройства с испарителем и с оребренным конденсатором (Лаврик и др., 2022; Горелик и др., 2019; Системы температурной стабилизации…, 2014). При наличии градиента температур между слоем вечной мерзлоты и наружным воздухом хладогент циркулирует в устройстве и понижает температуру грунта за счёт охлаждения внешнего воздуха. Однако, этот градиент – разница между температурой грунтов и температурой воздуха на юге Арктики – уменьшается ввиду климатических изменений, как следствие поддержание нормативных температур мёрзлых грунтов в основании зданий становится всё сложнее. В связи с чем, нормативы и правила строительства, особенно вблизи изменяющейся южной границ криолитозоны требуют постоянной актуализации. Необходим системный, научно-методический подход применения принципов строительства в районах распространения ММП, в том числе с обоснованием долгосрочной перспективы использования СОУ.

На южной границе криолитозоны располагаются почти все крупные города Ямала в том числе окружная столица – г. Салехард, который в 2024 году был одним из лидеров по вводу жилья в округе. Строительство здесь ведётся по I принципу с применением СОУ, за редким исключением. Как следствие взрывными темпами растёт количество охлаждающих систем (термосифонов). Вместе с тем геокриологическая обстановки вблизи г. Салехард значительно изменилась: температура мёрзлых грунтов за последние 40 лет с -1ºС повысилась до околнулевых значений, а её кровля с 1,5-2 м опустилась до 7-8 м (Королева и др., 2023; Malkova et al., 2022). Основные климатические показатели тоже говорят не в пользу устойчивости ММП: по данным Салехардской метеостанции с 1990 года величина линейного тренда повышения среднегодовой температуры воздуха составила +0,09°С/год, вместе с температурой увеличивается количество осадков. В связи со всем вышесказанным сделаем оценки перспектив эффективности СОУ и использования I принципа строительства в г. Салехард.

Исходя из технических характеристик современных СОУ и публикаций (Системы температурной стабилизации…, 2014; Галкин, 2013) можно принять, что теплообмен между грунтами, где установлены СОУ, и атмосферным воздухом начинается при температуре ниже -7°С. Но нужно понимать, что существует ещё множество факторов влияющих на теплообмен: культура эксплуатации ПП; ветровые показатели; температура грунтов в основании здания – разница между температурой грунтов и температурой воздуха уменьшается к концу зимнего периода и др. Мы оценим изменения продолжительности работы СОУ в годовом цикле. Используя данные метеостанции Салехард за последние 100 лет. Установим количество дней, когда средняя температура воздуха превышала нескольких значения: -7°С, -10°С и -15°С (рис. 1, сплошные линии). Анализируя полученные данные, можно заметить, что на рубеже 20-21 веков происходит смена тренда. Чтобы оценить, как быстро сокращается количество благоприятных для эффективной работы СОУ дней были рассчитаны линейные тренды для 1930-1990 гг. и 1990-2023 гг. (рис. 1, пунктирные линии). Видно, что если до 1990 г. ситуация была относительно стабильной и количество дней со средней температурой меньше -10 С колебалось вблизи пяти месяцев (140-150 дней), то за последние 30 лет благоприятный для эффективной работы СОУ период уменьшился почти на месяц (120 дней). Схожая ситуация наблюдается для двух других случаев -7°С и -15°С (рис. 1).

В дополнение к отрицательному тренду можно заметить резкие скачки на графиках: в 2020 г. количество дней со средней температурой меньше -10 С упало до трёх месяцев (рис. 1, красная

стрелка). Такие резкие колебания климатических показателей могут негативно сказаться на несущей способности грунтов ввиду отклонения от расчётного режима работы систем ТСГ.

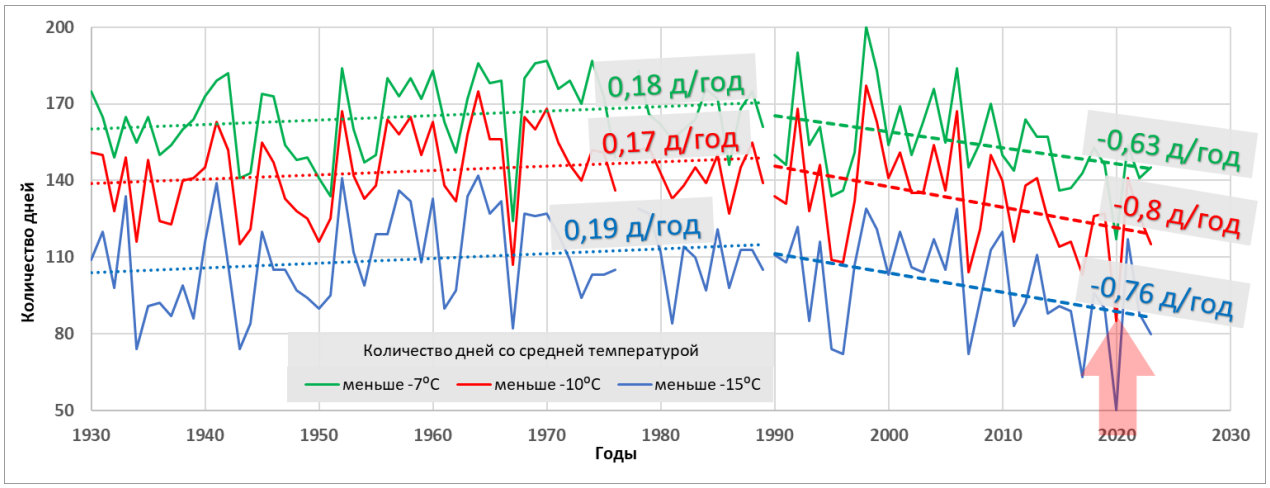


Рис. 1 Количество дней со среднедневной температурой меньше -7°C (зелёная), -10°C (красная) и -15°C (синяя кривая) по данным метеостанции Салехард.

Очевидно, что в обозримом будущем и при текущих темпах потепления эффективность ТСГ будет уменьшаться. Как следствие в будущем потребуется либо наращивание количества термосифонов, либо выводить их из работы. Любой сценарий влечёт значительные социально-экономические риски. В этой связи вызывает опасение повсеместное применение СОУ в городах с околонулевыми температурами мёрзлых грунтов и заглублённой кровлей. Необходима непрерывная актуализация нормативов и правил строительства вблизи южной границ криолитозоны, а также системный, научно-методический подход применения СОУ при строительстве, а дальнейшая их эксплуатация должна быть строго регламентирована.

Стоит сказать, что в работе приводится лишь один из возможных сценариев развития ситуации. Планируется провести более точные оценки эффективности работы СОУ для различных объектов. В том числе для решения этой задачи Научный центр изучения Арктики с 2018 года развивает в г. Салехард систему температурного мониторинга грунтов в основаниях объектов капитального строительства (Шеин и др., 2024; Башкова и др., 2025).

4 ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

С.В. Бойцов
АО «Научно-производственное предприятие «Эталон»
fgup@omsketalon.ru

Для безопасности функционирования объектов транспортной инфраструктуры и нефтегазового комплекса в северных районах России предложено осуществлять температурный мониторинг объектов с целью выявления и устранения аварийных ситуаций в районах вечномерзлого грунта с помощью различных систем мониторинга температур.

Разработанные системы мониторинга предназначены для полевого определения температуры грунтов по ГОСТ 25358-2012, где требуется получить данные о температурном состоянии грунтов.

Используя многолетний опыт в области термометрии, в целях обеспечения безопасности функционирования объектов нефтегазового комплекса, транспортной инфраструктуры и гражданских объектов на территориях многолетнемерзлых грунтов, АО «НПП «Эталон» разработало комплект оборудования геотехнического мониторинга температуры, предназначенный для полевого определения температуры грунтов по ГОСТ 25358-2012, где требуется получить данные о температурном состоянии грунтов.

Архитектура разработанных измерительных систем очень гибкая и позволяет в зависимости от поставленной задачи осуществлять оперативный, автономный или непрерывный мониторинг температуры грунта под основаниями зданий и сооружений, вдоль земляного полотна железных дорог, тем самым обеспечивая работоспособность и безопасность функционирования объектов в условиях вечной мерзлоты.

В состав систем мониторинга входят высокоточные средства измерений, устройства сбора и передачи информации, программное обеспечение. Это термокосы серии МЦДТ, контроллеры портативные ПКЦД, стационарные СКЦД, логгеры серии ЛЦД.

Для **автоматизированного сбора данных** разработан и запущен в производство **шкаф сбора и передачи данных ШСПД** (рис. 1) Устройство предназначено для автоматизированного сбора данных измерений температуры и других физических величин с контроллеров цифровых датчиков стационарных типа СКЦД по интерфейсу RS-485 и логгеров цифровых датчиков типа ЛЦД по радиоканалу с заданной периодичностью и передачи данных на сервер с последующей обработкой на ПК с помощью программного обеспечения «ГеоМет» (рис. 2).

Рис. 1. Шкафы сбора и передачи данных ШСПД, датчики МЦДТ 0922, контроллеры СКЦД-6/200

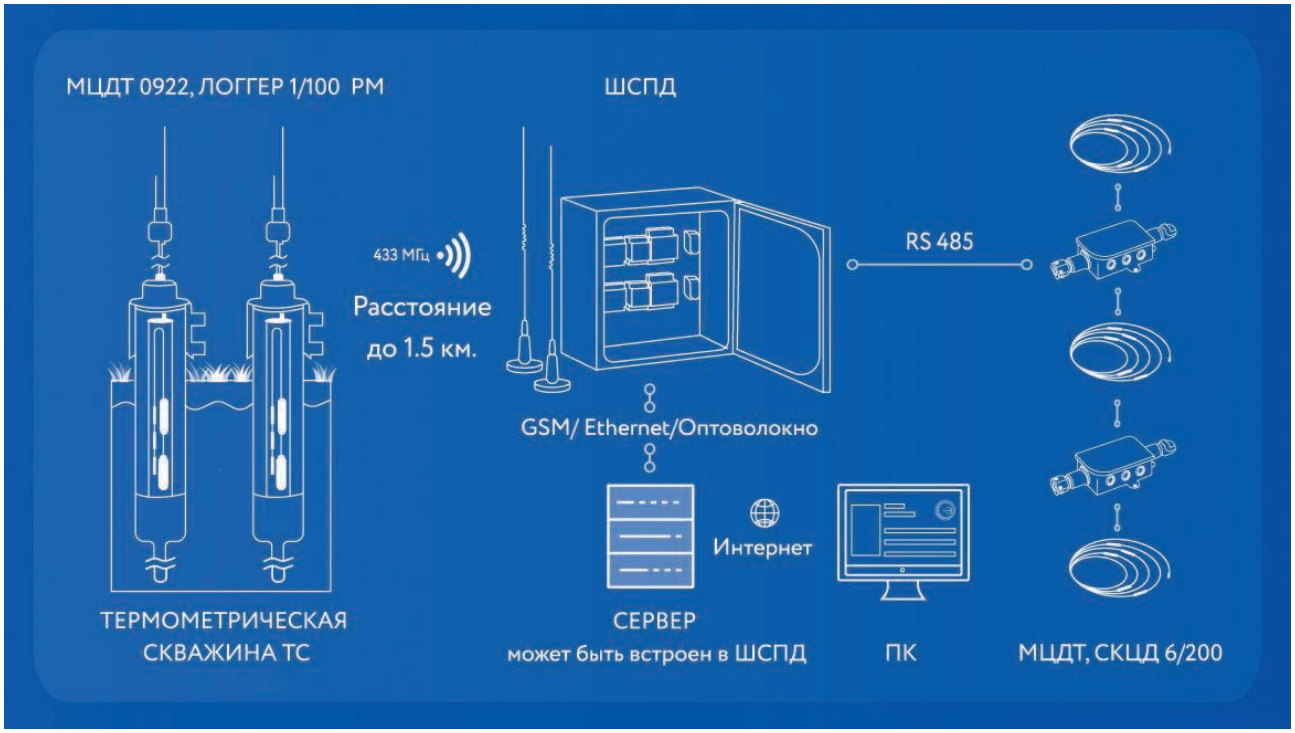


Рис.2. Конфигурация автоматизированной системы температурного мониторинга грунтов

В зависимости от варианта исполнения передача данных потребителю может быть осуществлена: по витой паре или оптоволокну на внешний сервер; по витой паре или оптоволокну на ПК со встроенного в ШСПД сервера; по GSM-связи на внешний сервер. ШСПД относится к радиоэлектронным средствам (РЭС), не подлежащим регистрации (полоса радиочастот 433,075-434,79 МГц, мощность передатчика не более 10 мВт), согласно п. 22 Приложения к перечню РЭС, подлежащих регистрации Постановления Правительства РФ от 12.10.2004 г. № 539. ШСПД имеет степень защиты от пыли и воды IP65 и оснащен термостатом для подогрева электроники для работы при отрицательных температурах окружающего воздуха до - 60 °С.

Оборудование позволяет проводить в режиме реального времени:

Измерения значений температуры объектов в различных средах (грунт, вода, воздух);

Сбор, накопление и хранение результатов температурного мониторинга без ограничений по объему данных;

Визуализация информации в удобной форме в виде графиков, графическое отображение динамики температуры;

Сигнализация о приближении значений температуры к критической отметке;

Автоматизированный, круглосуточный мониторинг. Работа системы возможна в отсутствие связи и электроснабжения.

Многие годы оборудование в различных ее конфигурациях, успешно эксплуатируется в таких компаниях как ПАО «Газпром», ПАО НК «Роснефть» и других организациях, осуществляющих свою деятельность в районах вечной мерзлоты, где требуется контролировать температурные режимы грунта.

ОЦЕНКА РЕАКЦИИ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ НА СОВРЕМЕННОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА

Варламов С.П., Скачков Ю.Б.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
svarlamov@mpi.ysn.ru

Оценка эволюции теплового состояния верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии на изменение климата дана на основе анализа данных геотемпературного мониторинга, организованного на экспериментальных площадках стационаров «Туймаада» и «Чабыда», на мониторинговых полигонах на право- и левобережье р. Лены на широте Якутска. Наблюдательные пункты охватывают элементарные ландшафтные комплексы 9 типов местностей с различными вариациями их литогенной основы, что позволили выявить их многолетнюю динамику в широком спектре природных условий в период 1981–2024 гг. [1].

Показателями изменения теплового состояния верхней толщи многолетнемерзлых пород (ММП) на изменения климата являются среднегодовая температура в слое годовых теплооборотов (глубина 10 м) (T_0) и мощность сезонноталого слоя (ξ). В пределах исследуемой территории ξ в зависимости от механического состава грунтов, а также от характера растительного, напочвенного покровов и влагосодержания отложений изменяется в больших пределах от 0,4 до 4,2 м, T_0 изменяется от +0,9 до -6,4 °С [2].

Тренды среднегодовой температуры в слое годовых теплооборотов, как показателя отклика на потепление климата (αT_0), в Центральной Якутии по типам местности распределены следующим образом: положительные – в межаласном (0,0086–0,1009 °С/год), в плакорном (0,0134–0,0428 °С/год); преимущественно положительные – в песчано-грядовом (-0,0069–0,0287 °С/год), в межгрядово-низинном (-0,0571–0,0176 °С/год), в мелкодолинном (-0,0246–0,0339 °С/год), в склоновом (-0,0028–0,0222 °С/год); отрицательные и положительные – в надпойменно-низкотеррасовом (-,0087–0,0378 °С/год) и преимущественно отрицательные – в аласном (-0,0132–0,0342 °С/год). При этом отрицательные тренды часто встречаются в менее дренированных типах местности (аласном, мелкодолинном), приуроченным к отрицательным формам рельефа. Не выявлено четкой эмпирической зависимости между трендами αT_0 и среднегодовой температурой воздуха ($\alpha T_{вг}$).

Тренды мощности сезонноталого слоя ($\alpha\xi$) по типам местности распределены таким образом: преимущественно отрицательные характерны для дренированных типов местности – в песчано-грядовом (-2,81–0,73 см/год), в склоновом (-1,16–0,43 см/год); преимущественно положительные – в надпойменно-низкотеррасовом (-0,19–0,32 см/год), в межгрядово-низинном (-2,72–0,60 см/год), в межаласном (-1,29–6,00 см/год), в мелкодолинном (-0,25–1,09 см/год). При этом зависимость между трендами $\alpha\xi$ и трендами суммы положительных среднемесячных температур воздуха ($\alpha T_{вл}$, °С/сезон) в дренированных типах местности (песчано-грядовом, межаласном, плакорном и склоновом) имеет обратную связь, в недренированных (мелкодолинном, межгрядово-низинном, пойменном и надпойменно-низкотеррасовом) – положительную, а в целом во всех типах местности преобладает обратная связь.

При оценке эволюции криолитозоны в условиях меняющегося климата представляет интерес сравнение трендов $\alpha T_{вг}$ и αT_0. По итогам многолетних наблюдений за тепловым состоянием грунтов естественных ландшафтов в разных типах местности показан безразмерный коэффициент термической устойчивости мерзлых толщ ($K_\alpha = \alpha T_0/\alpha T_{вг}$), предложенный А. В. Павловым [3]. При значениях K_α<0,50 отмечается высокая термическая устойчивость мерзлых грунтов, при 0,5<K_α<0,75 – средняя устойчивость и при 0,75<K_α<1,0 – слабая устойчивость мерзлых грунтов, если K_α>1,0 – неустойчивая [4].

В Центральной Якутии K_α в плакорном типе местности изменяется от 0,19 до 0,59, в межаласном колеблется в больших пределах 0,18–3,54, в песчано-грядовом – -0,10–0,38, в межгрядово-низинном – -0,62–0,25, в мелкодолинном – -0,78–0,50, в пойменном – -0,33–0,65, в склоновом – -0,04–0,33, в аласном – -0,36–0,29, в надпойменно-низкотеррасовом – -0,10–0,53. Отрицательные значения коэффициента K_α показывают охлаждение ММП в условиях потепления климата. Они встречаются в большинстве типов местности за исключением плакорного и межаласного. Также встречаются положительные значения коэффициента K_α превышающие 1,0 и более, когда тренды повышения среднегодовой температуры грунтов равно и значительно превышает тренды роста среднегодовой температуры воздуха. Это свидетельствует о деградации многолетнемерзлых пород. Например, это наблюдается в лесу в межаласном типе местности в период 2007–2023 гг., примыкающем к линейным сооружениям (железная дорога), в связи увеличением освещенности местности, из-за вырубки леса в полосе отвода дороги.

Таким образом для рассматриваемого региона количественно оценена реакция теплового состояния верхних горизонтов ММП на современное потепление климата, определяемого совокупным влиянием повышения температуры воздуха и основных параметров мерзлотных ландшафтов (растительного, напочвенного и снежного покровов, состава и льдистости (влажности) отложений). Несмотря на существенное потепление современного климата в районах, прилегающих к г. Якутску, динамика термического состояния многолетнемерзлых пород в естественных ландшафтах имеет разнонаправленную тенденцию, объясняемую в основном большой межгодовой изменчивостью режима снегонакопления. В годы уменьшения мощности снежного покрова происходит переохлаждение грунтовой толщи, что может циклически нивелировать общую тенденцию к потеплению. Современный период характеризуется, в зависимости от ландшафтных условий, преимущественно высокой и средней термической устойчивостью ММП. Также на локальных участках наблюдаются аградационные процессы связанные основном с режимом снегонакопления и увеличением биомассы, а деградационные процессы – на участках с близко залегающими подземными льдами, где происходит активизация термокарста. Мощность сезонноталого слоя в естественных ландшафтах является преимущественно достаточно стабильной величиной и характеризуется малой межгодовой изменчивостью. Тенденция возрастания мощности СТС статистически незначимая. В то же время локально встречаются участки со значимой тенденцией как возрастания, так и уменьшения мощности СТС.

Сбор и систематизация данных натурного исследования проведены в рамках НИОКТР (№122011800062-5), анализ данных и подготовка тезисов выполнены за счет гранта Российского научного фонда №23-61-10032.

1. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии – Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2021. – 156 с.

2. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н. Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. - 218 с.

3. Павлов А.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России / А.В. Павлов, Г.В. Малкова // Криосфера Земли, – 2009. – Т XIII, № 4. – С. 32–39.

4. Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 33-36.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУР ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ЮЖНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Гравис А.Г.[1,2], Гравис М.В.[1,3], Дроздов Д.С.[1,2], Халимьянов А.З.[1]
[1] Институт криосферы Земли, ФИЦ ТюмНЦ СО РАН,
[2] Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ)
[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ),
ag.gravis@yandex.ru

В XXI веке на фоне наблюдаемого потепления климата произошли значительные изменения геокриологических условий арктических территорий Российской Федерации, выражающиеся в деградации у поверхности многолетнемерзлых пород и активизации криогенных процессов. Процессы стали причиной ряда крупных аварий [1], связанных с разрушением инфраструктуры. Эти негативные изменения подчеркивают необходимость комплексного изучения и мониторинга геокриологической обстановки в условиях меняющегося климата.

Совместное использование фонового и геотехнического мониторинга обеспечивает комплексный подход к изучению геокриологических условий. Без данных фонового мониторинга невозможно прогнозировать риски и разрабатывать эффективные меры защиты инфраструктуры [2].

Целью данной работы является оценка динамики температуры многолетнемерзлых пород (ММП) в естественных условиях. На севере Западной Сибири первые массовые данные о температуре пород были получены в 70-х годах в ходе инженерно-геокриологической съемки территории нефтегазовых месторождений. С тех пор по настоящее время наблюдения за температурой ММП проводятся на площадках, организованных в подзоне северной тайги в пределах Надымской низменности в северной части Западно-Сибирской равнины. Территория относится к зоне островного распространения ММП, характеризуется умеренно континентальным климатом. Верхняя часть геологического разреза равнины представлена разнозернистыми песками, преимущественно мелкими и средними, с включением пылеватых фракций, а также маломощных линз и прослоев супесей и суглинков, местами перекрытые торфом. На глубине 4–8 метров эти отложения сменяются среднельдистыми суглинками, ММП приурочены в основном к торфяникам, грядам и буграм пучения. [3]

Динамика температуры ММП определяется изменениями климатических параметров. Одной из таких характеристик является приземная температура воздуха.

Анализ тенденций изменения температуры воздуха был выполнен по данным метеостанции Надым. За последние 60 лет среднегодовая температура воздуха значительно повысилась. В тоже время, за так называемый фоновый период (1961-1990) значение среднегодовой температуры составляло -5,9 °С, то за период 1991-2020 гг. данный показатель увеличился до -4,5 °С. Повышение температуры воздуха сопровождается смещением дат устойчивого перехода через 0 °С. Осенний период смещается к более поздним датам, сдвигаются даты установления снежного покрова. За период 1961-2024 гг. длительность периода с положительными температурами воздуха увеличилась на 31 день.

Температурный режим пород изучался по данным 12-и скважин, глубиной 10 м, примерно соответствующей глубине годовых нулевых амплитуд на момент бурения. Скважины пробурены в разные годы (с 1971 по 2015) и охватывают типичные мерзлотные ландшафты исследуемой территории.

Из анализа графика среднегодовых температур в скважинах с длительным рядом наблюдений (Рис.1) следует, что, например, наибольшие повышение температуры ММП произошло на крупнобугристом торфянике (скв. 11-75) с -1,7 до -0,1 °С. Температура пород под торфяно-моховым болотом (скв.23) приблизилась к нулю. Наблюдается выравнивание температур в остальных мерзлотных ландшафтах. Наиболее низкие температуры ММП наблюдаются на буграх пучения, сверху перекрытых торфяным слоем толщиной более 0,3 м, и составляют -1 °С, при этом разница температур между различными ландшафтами не превышает 1 °С.

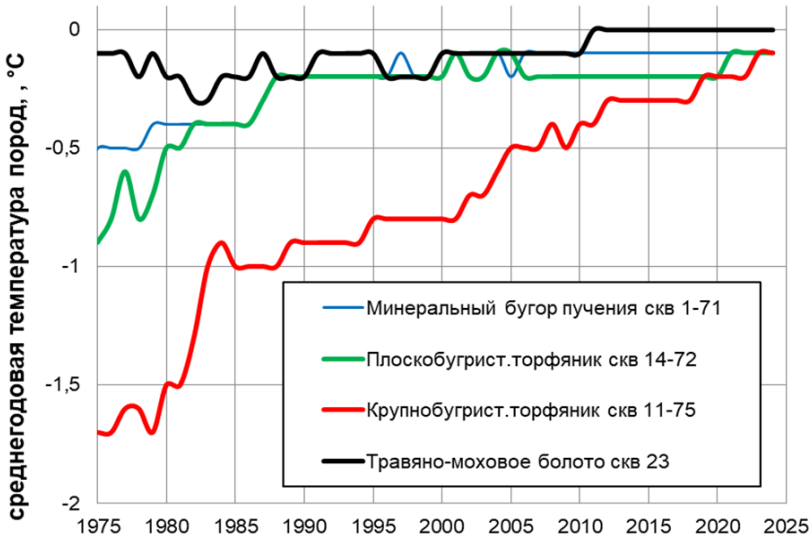


Рисунок. Изменение среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород

Зафиксированы многочисленные участки, где происходит опускание кровли многолетнемерзлых пород. В скважине, расположенной на плоскобугристом торфянике, за время наблюдения с 2017 г. кровля ММП опустилась с 3,5 м до 6 м. На крупнобугристом торфянике до 3,5 м. На бурге пучения начиная с 2020 года зафиксирован отрыв многолетней мерзлоты от подошвы деятельного слоя, здесь кровля ММП в данный момент опустилась до глубины 4 м.

Наиболее устойчивыми к повышению температуры являются слабодренированные низкие торфяники с толщиной органогенного слоя более 0,8 м [4].

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 25-27-00144 Расширение надмерзлотных таликов и изменение инженерно-геокриологических условий (южная криолитозона Западной Сибири)

1. Гребенец В.И., Кизяков А.И., Маслаков А.А. и др., Влияние
опасных криогенных процессов на инфраструктуру городов в Арктике // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*, 2022 с 25 -36.

2. Мониторинг вечной мерзлоты. — М.: Академический проект, 2024. — 468 с.

3. Комплексный мониторинг северотаежных геосистем Западной Сибири / Н.Г.Москаленко и др. – Новосибирск: ГЕО, 2012. – 207 с.

4. Гравис А.Г., Устинова Е.В., Пономарева О.Е. и д.р. Основные результаты мониторинга мощности деятельного слоя на площадках CALM Надымского стационара // Вестник МГТУ, труды Мурманского государственного технического университета, 2024 Т27, №1 с 39-51

РЕЗУЛЬТАТЫ 25-ЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СЕЗОННЫМ ПРОМЕРЗАНИЕМ ГРУНТОВ В ЗАПАДНОМ ПОДМОСКОВЬЕ

Гребенец В.И., Юров Ф.Д., Маслаков А.А., Сидорова Т.А.
МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра криолитологии и гляциологии, Москва
vgreb@inbox.ru

Сезонное промерзание практически повсеместно распространено в средней полосе России, однако, интенсивность этого процесса значительно отличается в зависимости от широкого спектра факторов среды и имеет высокую неоднородность в пространстве. Основными факторами, определяющими мощность сезонного промерзания грунтов являются климатические (ход температур в зимний период и высота снежного покрова), литологические (состав и предзимняя влажность грунтов) и ландшафтные (наличие и состав растительных ассоциаций, геоморфологическая позиция).

Полевые наблюдения за сезонным промерзанием в Западном Подмосковье непрерывно проводятся силами сотрудников и студентов кафедры криолитологии и гляциологии с зимы 1999-2000 года. В 1999-2003 гг. наблюдения проводились на территории Сатинского учебно-научного полигона в Боровском районе Калужской области; в 2004-06, 2007-09, 2011-15 и 2018-25 гг. – на территории Звенигородской биологической станции МГУ; в 2009-10 и 2015-2018 гг. – в окрестностях Красновидово.

Наблюдения за динамикой сезонного промерзания и факторами, на него влияющими, проводились в ходе маршрутных исследований в начале периода промерзания (как правило – последняя декада ноября – первые числа декабря), и в конце (во вторую-третью декаду февраля). Первый этап полевых работ включал в себя детальное описание точек наблюдений, закладку шурфов и закопушек с описанием механического состава грунтов, отбор проб грунтов для определения предзимней влажности. Количество точек наблюдений определялось исходя из разнообразия природных условий (геоморфологическая позиция, характер растительности) и в среднем составляло порядка 10-25 штук. В рамках второго этапа полевых работ проводилось измерение высоты снежного покрова и составлялось его описание, посредством закладки шурфов и закопушек измерялась мощность слоя сезонного промерзания, описывалось криогенное строение промерзшего слоя, отбирались пробы грунта для определения его влажности в конце зимнего периода.

Климатические параметры зимнего периода оказывают определяющее влияние на интенсивность и мощность сезонного промерзания грунтов. Для оценки погодных условий зимнего периода использовалась сумма отрицательных градусочасов до даты проведения второго этапа полевых исследований. Установлено, что пики средней глубины промерзания соответствуют наиболее холодным зимам. Например, максимальное за все время наблюдений сезонное промерзание (среднее значение по всем точкам наблюдений составляет 44 см) отмечается зимой 2002-2003 гг., когда сумма отрицательных градусочасов превышала 20000. Аналогичные значения промерзания грунтов (40 см) отмечаются и зимой 2005-2006 гг., когда сумма отрицательных градусочасов приближалась к 21000. Низким значениям суммы отрицательных градусочасов, наоборот, соответствуют минимальные значения промерзания. Например, в 2004 году, когда сумма отрицательных градусочасов составляла всего 10000, при сопоставимой высоте снежного покрова (43,5 см в 2003-2004 гг. и 45,3 см в 2002-2003 гг.) среднее значение мощности слоя сезонного промерзания не превышало 5 см.

Важным фактором, определяющим мощность сезонного промерзания, является высота и время формирования снежного покрова. Малая высота снежного покрова даже при относительно мягкой зиме приводит к формированию мощного слоя сезонного промерзания. Так, зимой 2007-2008 года высота снежного покрова к концу февраля в среднем составляла всего 24 см (в то время как обычно в это время высота снежного покрова составляет 45 см и более), что привело к глубокому промерзанию грунтов (среднее значение мощности слоя сезонного промерзания по всем точкам составило 40 см) даже при малой сумме отрицательных градусочасов (порядка 10000). При этом следующей зимой при сопоставимых значениях суммы отрицательных градусочасов, но значительно большей высоте снежного покрова (46 см) среднее значение сезонного промерзание по всем точкам не превышало 14 см.

Локальные изменения мощности сезонного промерзания грунтов на более низком пространственном иерархическом уровне определяются литологическими особенностями промерзающих грунтов и ландшафтными и геоморфологическими условиями. Характер растительности и геоморфологическая позиция территории находят свое отражение, в первую очередь, в перераспределении снежного покрова. Из-за пространственной неоднородности

теплоизолирующих свойств снежного покрова в рамках одного зимнего сезона возникают участки с кратно отличающейся мощностью сезонного промерзания. Например, в зимний сезон 2023-2024 гг. на поверхностях надпойменных террас р. Москвы и в локальных понижениях рельефа, где высота снега составляла от 50 до 80 см, не наблюдалось сезонного промерзания грунтов. В то же время на эрозионном склоне оврага, где максимальная высота снега составляла 30 см, было отмечено максимальное в этот сезон промерзание до 25 см. Для залесенных территорий важнейшим фактором, определяющим перераспределение снега и, соответственно, разницу в сезонном промерзании грунтов, является породный состав лесной растительности. Так, наименьшее промерзание на подобных поверхностях ежегодно фиксируется в еловых лесах, где мощность промерзшего слоя обычно в 1,5 раза меньше, чем в смешанных лесах. Например, в зимний период 2005-2006 гг. мощность промерзания в еловом лесу составила 25 см против 35-45 см на участках с березово-еловым лесом.

В ходе 25 лет наблюдений за сезонным промерзанием грунтов были не только выявлены ключевые факторы, определяющие мощность и интенсивность промерзания грунтов в средней полосе России, но и получено представление о динамике этого процесса в контексте климатических изменений. Установлено, что мощность сезонного промерзания демонстрирует тенденцию к уменьшению в последние 10 лет, а с 2020 по 2024 гг. промерзание грунтов носило фрагментарный характер. Лишь в зимний сезон 2024-2025 гг. из-за сочетания продолжительных (порядка 10 дней) заморозков при практически полном отсутствии снежного покрова (его высота на конец февраля в естественных условиях составляла от 2 до 10 см) было зафиксировано устойчивое сезонное промерзание в большинстве природно-территориальных комплексов в районе исследований.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ НА ПЛОЩАДКЕ CALM R24A-2 КУМЖА В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ПЕЧОРА, ПОЛУЧЕННЫХ В 2018 И 2024 ГОДАХ

Давыденко С.Ю. [1, 2], Судакова М.С. [1, 2], Садуртдинов М.Р. [1], Малкова Г.В. [1], Скворцов А.Г. [1], Царев А.М. [1]

[1] Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия

[2] МГУ им. М.В. Ломоносова

sofydav@mail.ru

Колебание климата влияет на таяние многолетнемёрзлых пород (ММП), что, в свою очередь, вызывает ряд серьезных проблем, затрагивающих различные аспекты жизнедеятельности человека, состояние природных экосистем и экономическую стабильность государств. По сравнению с мировыми показателями, в Российской Арктике, изменения среднегодовой приповерхностной температуры происходят аномально высокими темпами. За последние 35 лет скорость повышения среднегодовой температуры воздуха по данным метеостанций НАО от 0.08 до 0.12 °С/год [2] что в несколько раз больше общемирового тренда 0.03 °С/год [1]. В 2024 году зафиксирована рекордная аномалия глобальной приповерхностной температуры, составляющая 1.55 ± 0,13 °С относительно доиндустриальных значений [3]. Мерзлые породы быстро реагируют на климатические, техногенные и антропогенные воздействия. Изучение и мониторинг ММП крайне важен для оценки и прогнозирования их состояния для понимания природных изменений, экологии и рисков, связанных с инженерными сооружениями в зонах распространения криолитозоны.

Так, на площадке CALM R24A-2 Кумжа размерами 100х70 м в дельте реки Печора, расположенном в западном секторе Российской Арктики (НАО) в 70 км к северу от г. Нарьян-Мар, с 2015 года проводится фоновый мониторинг островной маломощной высокотемпературной мерзлоты с использованием геофизических методов. Криологическая съемка с использованием металлического щупа для определения мощности сезонно-талого слоя здесь не эффективна, так как кровля расположена на глубине более 3-х метров, поэтому, был привлечен геофизический метод георадиолокационного профилирования и зондирования. Георадарное зондирование позволяет с большей точностью определить скорость электромагнитной (ЭМ) волны до интересующей границы, что в дальнейшем позволяет произвести пересчёт из временного разреза в глубинный.

В данной работе приводится сравнение результатов георадиолокации, полученных на площадке Кумжа в 2018 т в 2024 годах. Основной задачей исследования мерзлоты заключается в наблюдении за динамикой изменения положения кровли ММП. Георадиолокационная съемка была выполнена георадаром Зонд-12е (НПФ “Радарные системы”, Латвия) с антенной типа бабочка 300 МГц на 88 профилях, расположенных через 10 м на площадке CALM R24A-2.

Для учёта изменения скорости по площадке сделано зондирование в 88 точках по методике общего пункта возбуждения (ОПВ) и общей глубинной точки (ОГТ) с шагом между точками зондирования 10 м. Шаг между трассами составил 50 см, максимальный вынос 5 м в каждую сторону при ОПВ, 10 м вынос у ОГТ. Зондирование выполнялось тем же радаром с использованием двух дипольных антенн 150 МГц. Скорости распространения электромагнитных волн в разрезе определялись путём подбора теоретических гипербол к осям синфазности отражённых волн.

Для обработки данных георадиолокации использовались ПО RadExplorer, Prism 2.70 и SeisPro. Для обработки радарограмм был применен следующий граф обработки: ввод геометрии и линейная интерполяция между трассами с шагом 10 см, удаление задержки, полосовая фильтрация, амплитудная коррекция за сферическое расхождение, удаление звона антенны.

На рисунке 1 представлены временные разрезы, где разными цветами показана кровля ММП в разные годы.

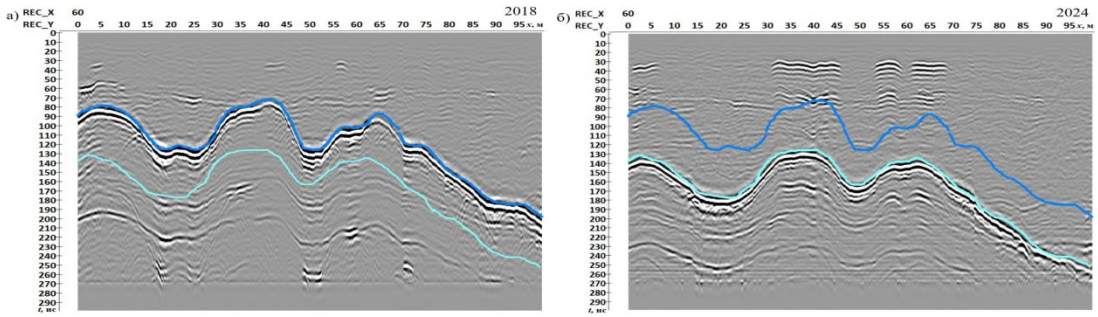


Рис. 1. Результаты георадиолокационного профилирования в 2018 (а) и 2024 (б) гг., где синей линией выделена кровля 2018 г., а голубой - кровля 2024 г. на временных разрезах по ПР g0-g10.

В результате, были построены временные и глубинные разрезы, построены карты кровли ППМ по площадке, в результате зондирования были определены скорости ЭМ волн по всему участку. Сопоставление данных, полученных в 2018 и 2024 гг., позволило оценить динамику изменений в мерзлотном разрезе. Было установлено, что глубина залегания кровли многолетней мерзлоты опустилась примерно на 2 м за 6 лет, что свидетельствует о продолжающемся процессе деградации мерзлоты.

1. Бардин М. Ю., Ранькова Э. Я., Платова Т. В. и др. Обзор современного состояния и изменений климата РФ // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2020. – No 3(163). – С. 69-77. – EDN LKENFB.

2. Малкова Г.В., Коростелев Ю.В., Садуртдинов М.Р. и др. Деградация многолетнемерзлых пород на Европейском севере в условиях современного потепления климата // III Юдахинские чтения: сборник научных материалов, Архангельск, 25–28 июня 2024 года. – Архангельск: КИРА, 2024. – С. 248-252. – EDN HCIHXL.

3. [Электронный ресурс]. - URL: https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2025/01/press-release-wmo-confirms-2024-as-warmest-year-on-record-at-about-1-55c-above-pre-industrial-level/ (дата обращения 5.03.25)

ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ ПОЧВЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЗВЕНИГОРОДСКОЙ БИОСТАНЦИИ МГУ В АНОМАЛЬНО ТЁПЛУЮ ЗИМУ 2024-2025 ГГ.

Данилов П.А., Епишин А.И., Жукова Е.Д., Ивакин Д.Р., Копыл Е.А., Кузякин Л.П., Леничева П.Д, Лупой Л.Д., Майорова М.В., Мартиросян М.О., Маслаков А.А., Миргеева В.В., Перминова Е.А., Стельмах Ю.Ю., Торгунакова Е.А., Федянина Е.А., Юров Ф.Д., Яготинцев Д.В.
МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва
lev_utmn@mail.ru

Сезонное промерзание почвы имеет повсеместное распространение для территории Центральной России. Его величина обуславливается погодными условиями зимнего периода. Изучение сезонного промерзания почвы актуально для выполнения прогнозных оценок весеннего половодья. Студентами и сотрудниками кафедры криолитологии и гляциологии Географического факультета МГУ наблюдения за сезонным промерзанием почвы ведётся ежегодно с начала 2000—гг. В зимний период 2024–2025 гг. наблюдения проводились на территории Звенигородской биостанции МГУ в Западном Подмосковье и проходили в 2 этапа – в начале зимнего периода (начало декабря) и в пик развития сезонно-мёрзлого слоя (СМС) и снежного покрова, в конце февраля.

Территория исследований характеризуется долинным комплексом р. Москва и прилегающей к ней моренной равниной. Поверхностные отложения представлены преимущественно суглинистым составом, в структуре растительного покрова преобладают смешанные берёзово-елово-сосновые леса. Исследования представляли собой маршрутные наблюдения в заранее установленных точках, отражающих типичные ландшафтные условия территории. Во время исследований производилось описание местности, почвенных разрезов, а также глубины сезонного промерзания и высоты и структуры снежного покрова, если они наблюдались.

Зима 2024/2025 гг. была аномально тёплой: например, среднемесячная температура января составляла -0.02ºС, при современной климатической норме в -6.2ºС. В начале декабря снежный покров составлял от 1 см в березово-еловом лесу на междуречье до 20 см в тальвегах оврагов, при этом глубина сезонного промерзания достигала 20,5 см под грунтовыми тропами, а в естественных условиях – 10 см на бровке склона оврага и 15 см в тальвеге оврага. В феврале 2025 года сумма отрицательных среднесуточных температур составила -127,2ºС при этом среднее значение за последние 5 лет составило -125,2ºС , самый тёплый февраль был в 2020 году (-27,9ºС), самый холодный – в 2021 (-303,9º, что позволяет говорить о том, зав течение тёплой малоснежной зимы один относительно средний по суровости месяц привёл к контр-интуитивной картине довольно глубокого промерзания почв Таким образом, сложилась уникальная ситуация, при которой в условиях малоснежной зимы глубина сезонного промерзания к концу февраля достигала 80 см при высоте снежного покрова 3-10 см. Однако аномально теплая температура в начале весны нивелировала глубокое промерзание почвы её ранним оттаиванием, поэтому риск появления высокого половодья весной 2025 г. за счёт сезонной мерзлоты в качестве водоупора отсутствует.

Наблюдаемые особенности имеют важное практическое значение:

• Во-первых, снижение глубины промерзания может снизить риск разрушения фундаментов вследствие морозного пучения, а также разрыв водопроводов мелкого заложения что имеет благоприятный эффект на строительство

• Во-вторых, нестабильность температурного режима и неоднородность промерзания во времени создают дополнительные проблемы для сельскохозяйственных объектов (выращивание озимых культур), а также оказывают влияние на различные почвенно-биологические процессы

Подводя итог, важно отметить, что аномально теплая зима 2024–2025 гг. на территории Звенигородской биостанции МГУ характеризуется относительно высокой глубиной сезонного промерзания, частыми циклическими изменениями температуры на поверхности, сдвигами в гидрологическом режиме, что требует учета данных факторов при планировании как инженерных и сельскохозяйственных, так и научно-исследовательских мероприятий для территории Западного Подмосковья.

РАДИОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОНИТОРИНГ И ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Ефремов В.Н.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
vnefremov@mpi.ysn.ru

Состояние многолетнемерзлых грунтов определяет устойчивость образуемой ими природно-технической системы в основании зданий и инженерных сооружений. Поэтому так важен прогноз его изменения, под климатическим воздействием. Его оперативный прогноз - это расчетная оценка состояния грунтов, ожидаемого в ближайший месяц, в зависимости от воздействия на него климатических факторов, на основании метеорологического прогноза. Основными климатическими факторами, значимо влияющими на состояние многолетнемерзлых грунтов, являются, по нашим представлениям, температура приземного воздуха, высота снегового покрова и дождевые осадки.

Влияние климатических факторов на состояние многолетнемерзлых грунтов изучено нами в результате радиоэлектромагнитного мониторинга, разработанного и проводимого нами с 2005 года на территории стационара ИМЗ СО РАН. Мониторинг проводился с 2005 года радиоимпедансным [1], а с 2017 - РМТ зондированиями бесконтактным способом. Наблюдаемыми сезонно-еженедельно параметрами являются удельные электрические сопротивления (УЭС) слоев грунтового массива, определяемые по результатам зондирования. Для геокриологической оценки состояния массива нами разработаны методики определения, по величине УЭС слоев, показателей влажности и льдистости грунтов.

Основное внимание, по понятным причинам, уделяем влиянию климатических факторов на состояние верхней части массива многолетнемерзлых грунтов, которую называем слоем переходной промороженности (СПП) [1]. От подошвы деятельного слоя (ДС), с глубиной, промороженность грунтов СПП возрастает до тех пор, пока не сравняется на его кровле со стабильным значением подстилающего опорного горизонта стационарной промороженности. Количественно, промороженность СПП, оцениваем по величине его УЭС на данной глубине и показателю льдистости. Ориентировочно, СПП занимает свое положение в песчаном массиве на глубине от 2 до 4 и более метров. Именно этот слой, наряду с деятельным слоем, представляется подверженным опасным деструктивным изменениям, до перехода в пластично-мерзлое, или даже талое состояние, при глобальном потеплении климата.

Влияние каждого из трех указанных климатических факторов, нами изучено и оценено [2]. Оно может быть использовано для оперативного прогнозирования параметров и состояния ДС и СПП. Для этого и для расчета показателей влажности ДС и льдистости СПП разработаны соответствующие формулы.

Температура приземного воздуха является основным климатическим фактором, влияющим на состояние мерзлых грунтов. Влияние остальных климатических факторов в изменении состояния грунтов СПП сводится к различающемуся воздействию осадков на тепловой поток, порождаемый температурой приземного воздуха (рис. 1).

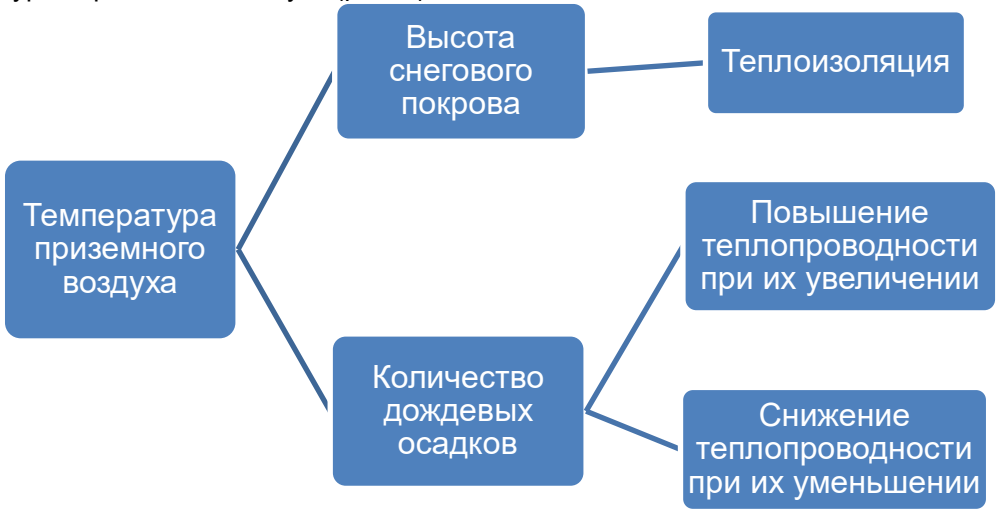


Рис. 1. Схема взаимосвязи климатических факторов с типом их воздействия на тепловой поток, изменяющий состояние грунтов.

Разработана методика оперативного прогноза состояния многолетнемерзлых грунтов по результатам радиоэлектромагнитного мониторинга их состояния, на основе контроля мощности и УЭС деятельного слоя и слоя переходной промороженности. Она содержит алгоритм расчета прогнозируемого геоэлектрического разреза (ГЭР) на основе учета данных радиоэлектромагнитного мониторинга и пошаговый расчет прогнозируемого летнего воздействия, в заданный период, каждого климатического фактора на ГЭР, полученный при весеннем мониторинге. То есть за отправную точку берется состояние грунтов, выраженное в ГЭР, который определяется по результатам весеннего радиоэлектромагнитного мониторинга. Последний, в финальной точке, преобразуется в прогнозное для лета состояние. При этом возможен учет всех прогнозируемых сценариев погоды на предстоящее лето. Оперативный прогноз позволит провести превентивные мероприятия при аномально развивающейся погодной ситуации и, тем самым, устранить, либо снизить возможные потери.

1. Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов. – Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2013. – 204 с.

2 Ефремов В.Н. Геофизическая оценка трансформации нестационарных слоев мерзлой толщи // Труды Всероссийской конференции с международным участием «Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата», посвященная 150-летию М.И. Сумгина 22-24 марта, 2023 г.

3. Ефремов В.Н. Геофизический мониторинг состояния мерзлых грунтов // «Целостность и ресурс в экстремальных усдовиях. Сборник материалов и докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН 19–23 сентября 2024 г. - Издательство АНО ДПО «Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании», г. Киров, 2024. - С. 146-149.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ГОРНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ СЕВЕРО-ВОСТОКА

Жунусова О.Р., Макарьева О.М., Нестерова Н.В.
Государственный гидрологический институт
zhun.oksana@gmail.com

Ландшафты Колымской водно-балансовой станции (КВБС) являются репрезентативными для значительной части Северо-Востока (СВ) России. Однако наблюдения на станции, в том числе за геокриологическими условиями, в 1997 году были прекращены. Это создает сложности при исследовании процессов формирования стока и анализе геокриологических условий в современных климатических условиях для обширного района верховьев бассейна р. Колымы. Новые данные, полученные с термометрических скважин, пробуренных в 2022 году в пределах КВБС [1], позволяют восполнить этот пробел.

Целью исследования является изучение современных гидрологических и геокриологических условий в гольцовых ландшафтах СВ. Объектом исследования является водосбор КВБС руч. Морозова (0.63 км^2), полностью расположенный в гольцовом ландшафте. В качестве метода исследования принята распределенная детерминированная гидрологическая модель «Гидрограф», ее особенность состоит в учете процессов протаивания и промерзания при моделировании стока [2]. В качестве граничных условий для моделирования процессов теплопроводности используется годовой ход температуры пород на заданной глубине. Ранее таких данных для гольцового ландшафта в наличии не было. В 2022 г. в пределах водосбора руч. Морозова на высоте 1182 м пробурена термометрическая скважина глубиной 15 м [1], оборудованная автоматическим логгером. Среднегодовая температура на глубине 15 м составляет -3.8±0.2°C за период 2022-2024 гг. Максимальная глубина протаивания в 2024 г. составила 1.9 м. Возле скважины дополнительно производятся наблюдения за высотой снега, которые были также использованы в процессе моделирования. В работе использованы как исторические материалы КВБС (1968-1997), так и современные данные мониторинга (2022-2024).

Моделирование процессов формирования стока, процессов протаивания и промерзания проводилось на суточном интервале за два периода в сосредоточенном варианте. Новизной работы является использование полученных авторами данных о температуре пород в гольцовом ландшафте для моделирования стока. За период 1968-1996 гг. среднее значение критерия эффективности Нэша-Сатклиффа составило – 0,65, медианное – 0,69 (что на 0,13 выше, чем в работе [2]). Сравнение рассчитанных и наблюденных гидрографов стока показывает удовлетворительное совпадение гидрографов, как по фазе, так и по амплитудам (рис. 1). Невязка среднемноголетнего слоя стока составила -9%. Также для оценки эффективности модели было проведено сравнение рассчитанных и наблюденных характеристик снежного покрова, динамики деятельного слоя и испарения. Результаты моделирования приняты удовлетворительными.

При моделировании периода 2021-2024 гг. задачей было оценить качество воспроизведения моделью «Гидрограф» наблюденные температуры пород на различных глубинах. Анализ показал, что модель завышает температуру пород на всех глубинах в период полного промерзания пород (рис. 2). Средняя глубина протаивания по результатам моделирования за период 1968-1996 гг. составила 1.1 м, за период 2021-2024 гг. – 1.37 м. Глубина протаивания по данным наблюдений со скважины «Гольцы» за 2024 год составила 1.9 м., по данным литературных источников – 1,2 м [3].

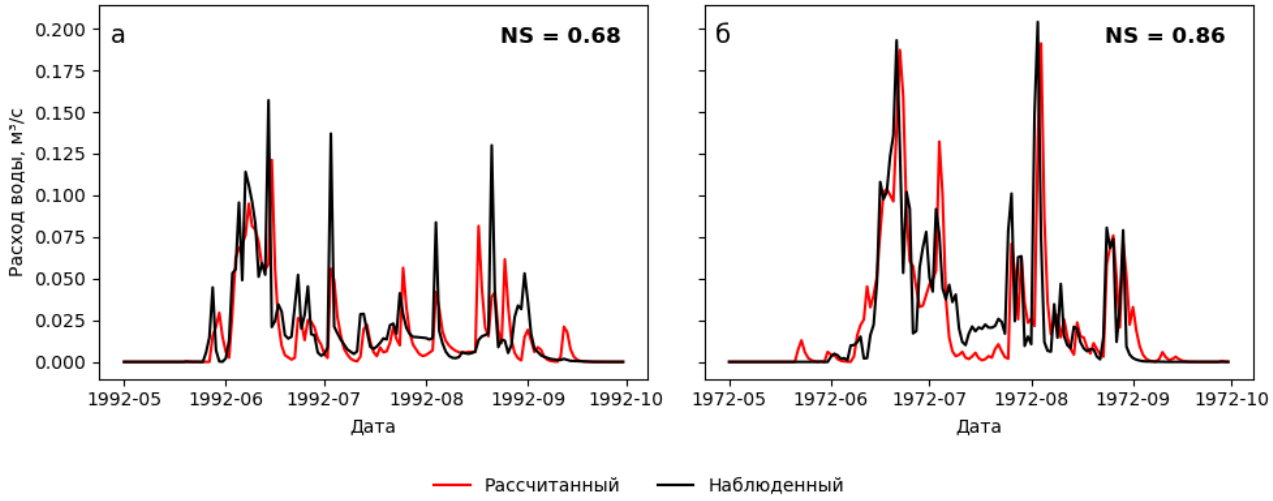


Рис. 1. Сравнение рассчитанных и наблюденных суточных гидрографов стока за 1992 (а) и 1972 (б) годы. Значения критерия Нэша-Сатклиффа (NS) указаны на графиках.

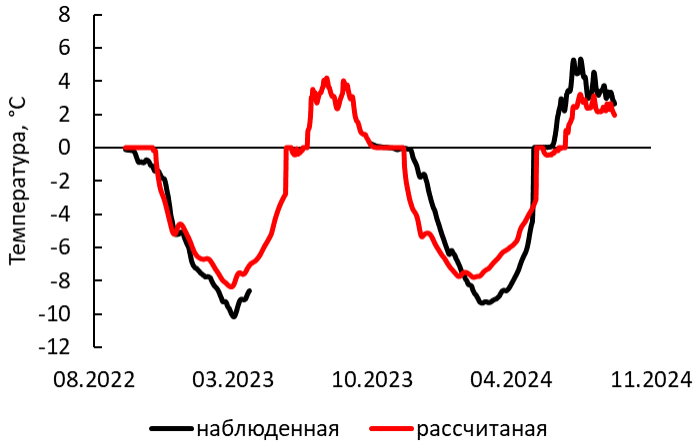


Рис. 2. Сравнение рассчитанных и наблюденных температур пород на глубине 1 м.

Полученные результаты показывают, что модель «Гидрограф» адекватно воспроизводит процессы формирования стока и динамику деятельного слоя, однако наблюдается систематическое занижение глубин протаивания. По результатам моделирования наблюдается увеличение средней глубины протаивания на 0.27 м в современных климатических условиях. Использование новых геокриологических данных позволяет улучшить моделирование характеристик деятельного слоя и речного стока в условиях многолетней мерзлоты.

1. Температура многолетнемерзлых пород Верхнеколымского нагорья по данным термометрических скважин за 2021-2022 годы / О. М. Макарьева, Д. А. Абрамов, А. А. Землянскова [и др.] // Криосфера Земли. – 2024. – Т. 28, № 3. – С. 19-32.

2. Макарьева О. М., Лебедева Л. С., Виноградова Т. А. Моделирование процессов формирования стока на малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водно-балансовой станции) // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 24. – №. 1. – С. 43-56.

3. Банцекина Т.В. Особенности гидротермического режима слоя сезонного протаивания крупнообломочных склоновых отложений в весенне-летний период (на примере Верхнеколымского нагорья): Автореф. дис. … канд. геогр. наук. Якутск, 2003, 23 с.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ГЕОТЕХНИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ НЕФТЕСБОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ТАЗОВСКОГО НГКМ

Д.В. Копылов
ООО «Меретояханефтегаз», г. Тюмень
kopylovdmitr@yandex.ru

Тазовское нефтегазоконденсатное месторождение расположено на территории криолитозоны со сплошным распространением многолетнемерзлых грунтов. Понятие «сплошное распространение» преувеличено и не является буквальным, так как на территории криолитозоны располагается большое количество водотоков и водоемов (водных объектов) в непосредственной близости которых, грунты могут находиться в талом состоянии в течении многих лет. Такие участки талых грунтов - талики могут распространяться на десятки метров от водного объекта как по глубине, так и по латерали. Талики динамичны, их размеры могут меняться, так как температурное поле водного объекта нестационарно.

Нефтесборные трубопроводы месторождения проектируются надземно на опорах по I принципу, с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии в течении всего жизненного цикла сооружения. В связи с тем, что трубопроводы – линейные сооружения, они пересекают водные объекты с таликами, где несущая способность талых грунтов ниже по сравнению с мерзлыми грунтами. Кроме того, талые влажные дисперсные грунты подвержены морозному пучению, когда при промерзании поровая вода кристаллизуется в процессе фазовых переходов, увеличивается в объеме и с помощью касательных сил морозного пучения выталкивает опоры трубопровода, повреждая его.

Для обеспечения безопасности и технической надежности трубопроводов в процессе эксплуатации на месторождении внедрен комплексный подход к контролю за состоянием оснований и фундаментов его конструкций с помощью геодезических, температурных, визуально-инструментальных и геофизических (электроразведочных) методов в рамках геотехнического мониторинга (ГТМ). Геодезические методы ГТМ выполняются для определения планово-высотного положения фундаментов и кренов сооружений, температурные методы – для определения температуры грунтов основания сооружений, визуально-инструментальные – для фиксации дефектов и повреждений в конструкциях, а также для определения работоспособности термостабилизаторов грунта, геофизические (электроразведочные) методы – для детального изучения геокриологического строения разреза и картирования талых, слабых по несущей способности, пучинистых грунтов.

Картирование таликов методами электроразведки осуществляется за счет высокой дифференциации мерзлых и талых грунтов по удельной электропроводности или обратной величине - удельному электрическому сопротивлению. Удельная электропроводность характеризует способность грунтов проводить электрический ток. Грунты являются гетерогенными средами, состоящими из твердой фазы, образующей скелет, и жидкой, газообразной фазы заполняющих поры. В поровом пространстве двойной электрический слой влияет на электропроводность грунта. Дисперсные грунты обладают ионным типом проводимости при котором ток распространяется по поровой влаге, содержащей растворенные соли. При фазовом переходе поровой влаги в лед, сначала замерзает гравитационная вода в порах, повышая удельное электрическое сопротивление. С понижением температуры замерзает вода в двойном электрическом слое, увеличивая сопротивление прохождению электрического тока. В связи с этим выполняется разделение талых и мерзлых грунтов по удельному электрическому сопротивлению.

ДЕГРАДАЦИЯ ГОРНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ ПО ДАННЫМ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Лебедева Л.С., Гончаренко В.В.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
lyudmilaslebedeva@gmail.com

Горы центральной части Евразии является крупнейшей в мире областью развития альпийской криолитозоны. В регионе происходит быстрое изменение климата и деградация ледников (IPCC, 2023, Kapitsa et al., 2020), что позволяет предположить и таяние многолетнемёрзлых пород (ММП). Крайне мало точек регулярного и длительного термометрического мониторинга существует в горных областях Центральной Азии. В среднем по всей высокогорной области Азии в период с 1960-х по 2010-е годы температура ММП повышалась со скоростью 0,17 °C за десятилетие, что сопровождалось увеличением максимальной глубины сезонного протаивания на 4,4 см за десятилетие (Ran et al., 2022). Целью работы являлась характеристика температурного режима ММП и оценка его изменения на ключевом участке высокогорной криолитозоны северного Тянь-Шаня за последние 30 лет.

Анализ температуры пород на разных глубинах по данным наблюдений в 25-метровой скважине, расположенной на перевале Жосалыкезень (хр. Заилийский Алатау, северный Тянь-Шань), показал, что статистически значимый положительный тренд среднегодовых температур пород фиксируется на глубинах от 5 до 25 м. Растепление пород происходит на подошве сезонно-талого слоя (5 м) и в нижней части мерзлой толщи (25 м), что говорит о возможной деградации ММП как сверху, так и снизу. На глубинах 5-25 м температура пород по месяцам преимущественно увеличивается, однако величина тренда невелика, как правило, меньше 0,1°C/10 лет. Только на глубине 5 м в осенние месяцы температура повышается на 0,27-0,49°C/10 лет. Динамика среднемесячных температур на глубине 5 м говорит об увеличении глубины сезонного протаивания после 2010 г. в исследуемом разрезе, однако образования субаэрального надмерзлотного талика пока не происходит. На глубинах 0, 1 и 2 м температура пород статистически значимо растет летом, на глубине 3 м – с августа по октябрь. Происходит продвижение интенсивного, статистического значимого роста температур пород от поверхности, где он фиксируется в летние месяцы, до глубин 5-15 м, где максимальные величины тренда наблюдаются в осенне-зимние месяцы, и до глубин 20-25 м, где они происходят в конце зимы и весной. Максимальная величина тренда на разных глубинах уменьшается от 3°C/10 лет на поверхности, до 0,08°C/10 лет на глубине 25 м.

Работа выполнялась за счёт проекта НИОКТР 122012400106-7 “Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования” и проекта НИОКТР 122011800064-9 “Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене”.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Ocean, cryosphere and sea level change. In Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1211–1362). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.011

Kapitsa, V., Shahgedanova, M., Severskiy, I., Kasatkin, N., White, K., & Usmanova, Z. (2020). Assessment of changes in mass balance of the Tuyuksu group of glaciers, Northern Tien Shan, between 1958 and 2016 using ground-based observations and Pléiades satellite imagery. Frontiers in Earth Science, 8, 259. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00259

Ran, Y., Li, X., Che, T., Wang, B., & Cheng, G. (2022). Current state and past changes in frozen ground at the Third Pole: A research synthesis. Advances in Climate Change Research, 13(5), 632–641. https://doi.org/10.1016/j.accre.2022.07.00

РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕТЬ МОНИТОРИНГА МЕРЗЛОТЫ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ

***Макарьева О.М.[1,2], Абрамов Д.А. [3], Землянскова А.А.[2,3], Осташов А.А.[4], Нестерова Н.В.[4]**
[1] Северо-Восточный государственный университет
[2] Санкт-Петербургский государственный университет
[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
[4] Государственный гидрологический институт
** omakarieva@yandex.ru*

В 2021-2024 гг. в Магаданской области развернута региональная сеть термометрических скважин для мониторинга температуры горных пород в различных ландшафтных условиях. Всего к настоящему моменту пробурены 23 скважины глубиной от 5 до 30 м. Высота расположения скважин изменяется от 162 до 1182 м. Схема расположения скважин представлена на Рис. 1, а характеристики в Табл. 1.

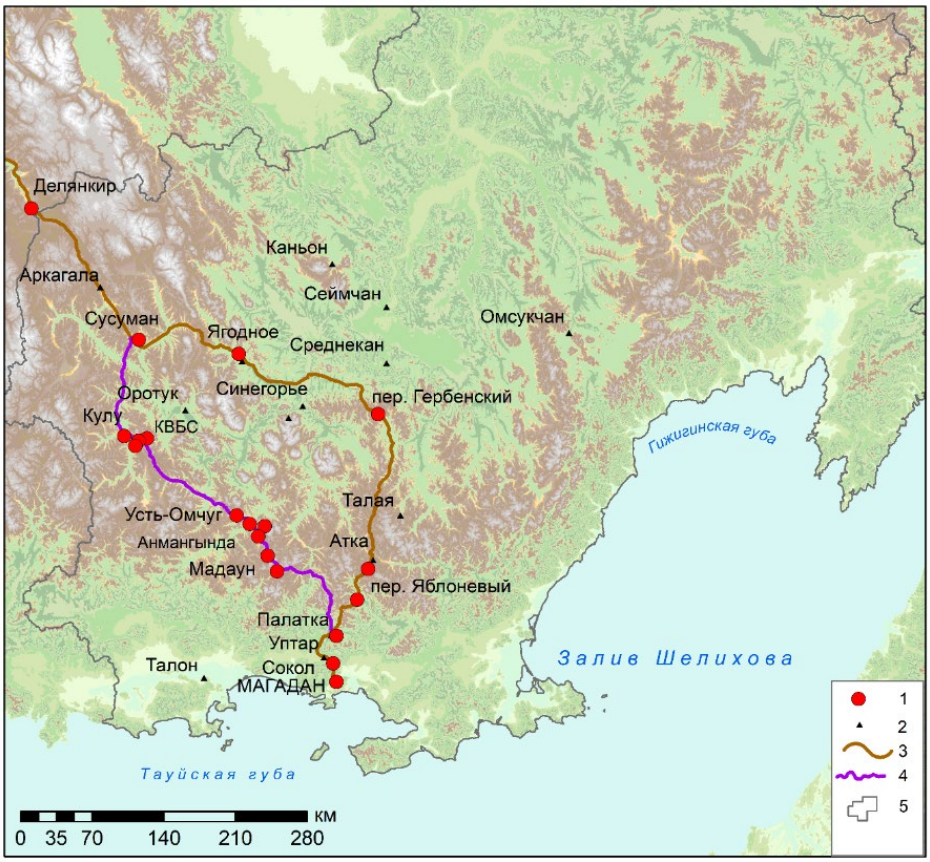


Рисунок. 1. Региональная геокриологическая сеть мониторинга Магаданской области 2021-2024 гг. (1 – скважины авторов, 2 – метеостанции Росгидромет, 3 – трасса «Колыма», 4 – Тенькинская трасса, 5 – граница Магаданской области)

Для измерения температуры пород используются термокосы ООО «Импеданс» (Москва) длиной от 5 до 30 метров, оборудованные герметичными датчиками температуры, а также температурные датчики американской компании «HOBO» – TMCx-HD. Логгеры, подключаемые к вышеуказанным датчикам, обеспечивают автономность работы до 10 лет.

Для наблюдения за метеопараметрами, такими как температура воздуха, количество осадков, скорость и направление ветра, используется оборудование Hobo Onset RG3-M и KESTREL 5000. Приборы устанавливаются вблизи скважин с целью учета микроклимата местности, на высоте 1,5-2,0 м, смотрящими на север во избежание нагрева на солнце. Также в зимнее время почти все скважины оборудованы снегомерными постами, которые представляют собой фотоловушку со снегомерной рейкой, установленной в репрезентативной для местности точке. Фотографии делаются каждые сутки и в последующем по ним определяется высота снежного покрова, необходимая для

интерпретации данных о температуре пород. Также зимой проводятся снегомерные съемки для определения высоты и плотности снежного покрова.

Таблица. 1. Характеристики оборудованных скважин, 2021-2024 гг.

№	Название	Широта, град	Высота, м	Тип местности	Растительность	Глубина скважины, м	Среднегодовая температура	Глубина оттаивания/промерзания, м
1	Гольцы	61,8	1182	Горно-привершинный	Отсутствует	15	-3,8	1,9
2	Сопка	60,8	1027		Лишайниковый напочвенный покров с редкими лиственницами и кедровым	15	-3,2	1,3
3	пер. Кулу	61,8	1170		Лишайниковый напочвенный покров с редкими лиственницами и кедровым	15	-2,4	1,3
4	Вертолет	59,6	162		Лиственничное редколесье с кедровым стлаником	30	3	2,5
5	пер. Гербенский	62,0	913		Кедровый стланик с рединами ягеля	15	-2,9	1,8
6	пер. Яблоновый	60,6	930		Лиственничное редколесье с кедровым стлаником	15	-1,3	1,9
7	Ягодное	62,5	567		Кедровый стланик	15	-1,3	4,5
8	пер. Гусакова	60,4	989		Единичные лиственницы с кедровым стлаником	15	-3,8	3
9	Елки	60,8	1121		Единичные лиственницы без напочвенного покрова	15	-4,9	-4,9
10	ГП2	60,9	712	Горно-долинный террасовый	Травянисто-осоковый покров с единичными угнетенными	15	-1,8	0,9
11	Делянкир	63,8	801		Лиственничное редколесье с кедровым стлаником	15	-6,9	-
12	пос. Кулу	61,9	618		Луговая растительность с ивами	15	-2,7	1,7
13	Сокол	59,9	175		Лиственничный лес с кедровым стлаником	30	1,9	2
14	CALM УО	61,1	600		Лиственничное редколесье со сфагнумом	15	-3,6	1
15	Сусуман	62,8	669		Спорадически распространенный сфагнум с травянистой растительностью	5	-4,1	0,8
16	Эликчан	60,8	794		Сфагновая марь	5	-2	0,4
17	Солонцовый	60,9	803	Горно-долинный прирусловой	Лиственницы с кедровым стлаником	5	0,6	2,6
18	Наледь	60,9	744		Отсутствует	13	-0,2	3,6
19	Букэсчен	60,7	978		Лиственничный лес с кедровым стлаником	15	-0,6	1,6
20	Верхний	61,8	961		Лиственничный лес с кедровым стлаником и рединами ягеля	15	-0,6	2,6
21	Палатка	60,1	346		Лиственничный лес с кедровым стлаником	30	-0,4	3
22	Школа УО	61,1	580		Тополя, чозении	30	3,4	2,1
23	Бургандя	60,6	670		Лиственничный лес с кедровым стлаником	6	1,9	-

Скважины пробурены и оборудованы в 2021-2022 гг. в рамках проекта НИР Санкт-Петербургского государственного университета № 94034170, в 2023-2024 гг. – в рамках проекта Российского научного фонда и Правительства Магаданской области № 23-17-20011 «Оценка рисков опасных явлений для инфраструктуры Магаданской области, вызванных климатически- и антропогенно-обусловленной трансформацией многолетнемерзлых пород».

ИТОГИ 40-ЛЕТНЕГО ИЗУЧЕНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА НА ОБЪЕКТАХ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Малкова Г.В.
Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, РФ, Тюмень
galina_malk@mail.ru

Геокриологический мониторинг важен для понимания общих тенденций развития вечной мерзлоты, особенно в условиях потепления климата и существенных климатических аномалий последних десятилетий. Подавляющее большинство данных о состоянии криолитозоны, а также о ее взаимодействии с объектами инфраструктуры нуждается в обновлении и актуализации. Объекты мониторинга криолитозоны с длительными рядами наблюдений позволяют определить тренды геокриологических изменений и делать оценки снижения прочностных свойств и потери несущей способности грунтов оснований зданий и сооружений. Криолитозона Европейского севера является наиболее пестрой и наименее устойчивой по сравнению с другими территориями Российской Арктики. В тех же природных и геокриологических зонах мерзлота здесь является более высокотемпературной, а мощность мерзлых толщ - меньше.

На территории криолитозоны Европейского севера за последние 30 лет наблюдается существенное увеличение темпов потепления климата в 2-4 раза по сравнению с периодом климатической нормы (рис. 1).

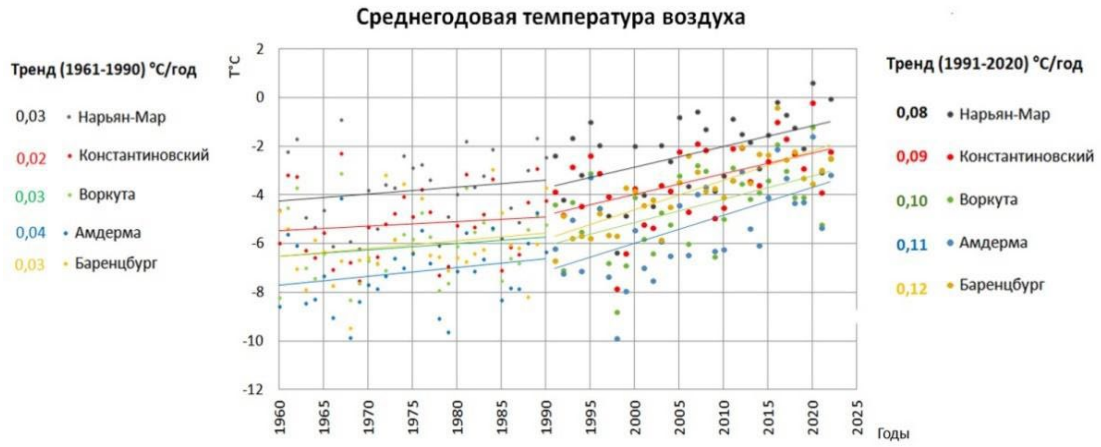


Рис. 1. Тренды среднегодовой температуры воздуха на метеостанциях Европейского севера

В криогенных ландшафтах Европейского севера с конца XX века наблюдаются исключительно положительные тренды среднегодовой температуры ММП от 0,01 до 0,05°С/год, но они в несколько раз отстают от темпов повышения температуры воздуха. Наибольшие тренды в естественных ландшафтах характерны для низкотемпературных пород, а наименьшие – для высокотемпературных (рис. 2).

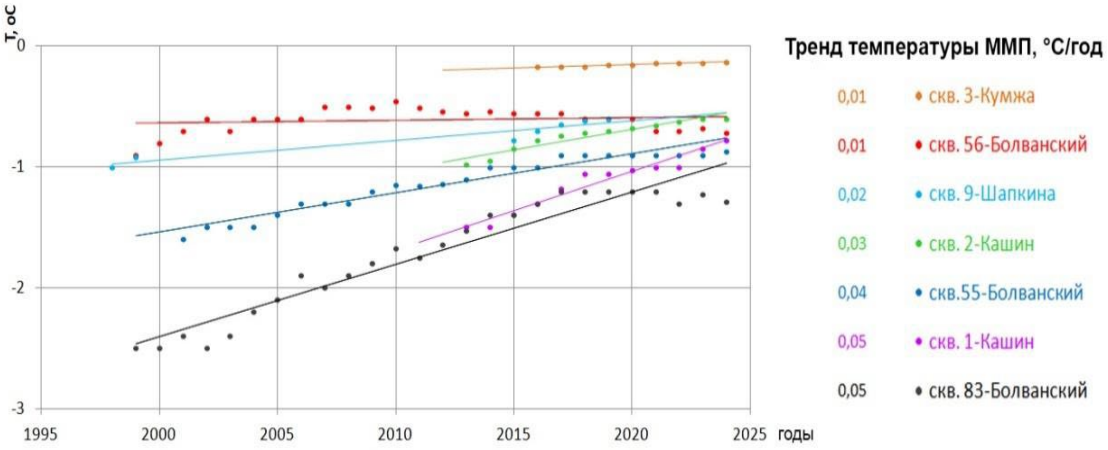


Рис. 2. Тренды среднегодовой температуры пород на объектах мониторинга

В XXI веке мы наблюдаем не увеличение трендов повышения среднегодовой температуры ММП вслед за потеплением климата, а их уменьшение. Уже к 2020 г. повышение температуры пород в низкотемпературных ландшафтах существенно замедлилось, поскольку фазовые переходы в верхних горизонтах ММП тормозят процесс растепления.

Вслед за повышением температуры ММП в южнотундровой природной зоне началось формирование несквозных таликов в понижениях рельефа (хасыреи, ложбины стока, лога) и на закустаренных склонах, где накапливается наиболее мощный снежный покров, препятствующий зимнему охлаждению, а также на нарушенных площадках. Глубина кровли ММП на участках новообразования таликов определялась с помощью сейсморазведки, георадарной съемки, бурения скважин и термометрии, и настоящее время изменяется от 2-5 до 10-12 м.

Изменения геокриологических условий проанализированы с помощью картографической модели, созданной с использованием геосистемного подхода, ландшафтной типизации территории и натурных данных, полученных на опорных объектах мониторинга с 80-х годов прошлого века по настоящее время. Разработанные карты (рис. 3) отображает температурный режим различных криогенных ландшафтов и развитие таликов в центральной части НАО для двух временных срезов – 1980-е годы XX века (А) и 2020-е годы XXI века (Б).

Диапазон изменения среднегодовой температуры ММП за 40 лет сократился от 0…-5°С в XX веке до 0…-2°С, редко до -3°С в настоящее время. За счет разных трендов повышения температуры пород произошло выравнивание температурного поля. Талых участков на водоразделах в XX веке практически не встречалось в пределах выбранного фрагмента карты, но сейчас несквозные талики занимают уже около 25% площади территории.

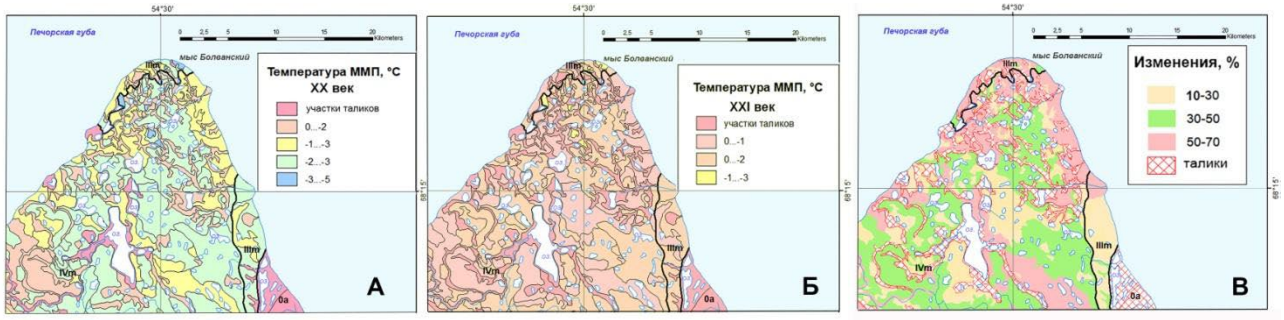


Рис. 3. Изменение среднегодовой температуры ММП для двух временных интервалов: А – 1980-е годы XX века, Б –2020-е годы XXI века; В - относительные изменения (%) сопротивления мерзлого грунта сдвигу по поверхности смерзания с фундаментом, $\mathbf{R_{af}}$, обусловленные повышением температуры ММП за 40 лет

На той же контурной основе построена карта относительных изменений (в %) сопротивления мерзлого грунта сдвигу по поверхности смерзания с фундаментом ($\mathbf{R_{af}}$), обусловленных увеличением температуры ММП за 40 лет (рис. 3, В). По ориентировочным расчетам (в соответствии с таблицами СНиП 2.02.04-88) при повышении среднегодовой температуры пород их прочностные характеристики повсеместно ухудшаются, но с разной интенсивностью. Наиболее существенные изменения $\mathbf{R_{af}}$ (на 50% и более) происходят в низкотемпературных криогенных ландшафтах, к которым относятся возвышенные холмистые поверхности, занятые дренированными или пятнисто-медальонными тундрами, поскольку именно там мы наблюдаем самые высокие тренды повышения температуры ММП при потеплении климата.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ОСАДКИ ОТТАИВАЮЩИХ ПОРОД НА МОНИТОРИНГОВЫХ ПЛОЩАДКАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ, ПРИМОРСКИХ РАВНИН ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ И СЕВЕРНОЙ АЛЯСКИ

Маслаков А.А.[1], Стрелецкий Д.А.[2], Д.Г. Замолодчиков[3], Шикломанов Н.И.[2], Каверин Д.А.[4], Пастухов А.В.[4]

[1] МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва
[2] Университет Джорджа Вашингтона, Вашингтон, Округ Колумбия (США)
[3] Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А.С. Исаева РАН, Москва
[4] Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
alexey.maslakov@geogr.msu.ru

Влияние современных климатических изменений на мерзлотные условия в криолитозоне имеет глобальный охват и является предметом многочисленных мониторинговых исследований. Наряду с детально изученной динамикой температурного режима мёрзлых пород и мощности сезонноталого слоя (СТС), долгосрочные полевые наблюдения обнаруживают неявные эффекты от деградации многолетнемёрзлых пород (ММП). Одним из последствий постепенного перехода верхних многолетнемерзлых горизонтов в СТС является понижение дневной поверхности, вызванное осадкой оттаивающих пород и протекающее без образования специфических термокарстовых форм рельефа. Многолетние полевые и дистанционные наблюдения за динамикой дневной поверхности проводятся в различных регионах криолитозоны и доказывают глобальный масштаб процесса опускания дневной поверхности (Streletskiy et al., 2025). Наиболее высокие скорости вертикальных движений поверхности отмечены в регионах с преобладанием высокольдистых мёрзлых пород, например, едомы.

Район приморских равнин Восточной Чукотки является территорией, где в почвогрунтах развит высокольдистый верхний (переходный) слой ММП и широко распространены залежеобразующие льды. Наблюдения за динамикой глубины сезонного оттаивания почв здесь были организованы в 2000 г. на площадке мониторинга деятельного слоя CALM Лаврентия. В пос. Барроу (север Аляски) измерения проводились в середине 1960-х гг. и ежегодно с 1991 г. вдоль двухкилометровой трансекты. В 2003 г. на Чукотке мониторинговые исследования были дополнены измерением колебаний высоты дневной поверхности, которые проводились путём определения относительной высоты вмороженных в ММП пикетов, расположенных в узлах площадки CALM (всего 121 узел). В Барроу измерения вертикальных движений поверхности проводились с использованием DGPS в 20 точках трансекты ежегодно в момент измерения СТС в конце летнего сезона. На площадке R2 в восточноевропейской тундре динамика дневной поверхности определялась оптическим нивелиром с 1999 г. В условиях близкого к поверхности залегания высокотемпературных ММП здесь также выражен льдистый переходный слой.

Результаты показали, что при относительно слабом тренде на увеличение мощности сезонноталого слоя (0,3 и 0,4 см/год на Аляске и Чукотке, соответственно), скорость опускания дневной поверхности на Аляске и Чукотке сильно различается. В Барроу осадка составила 13 см за 2003-2024 гг. и в основном происходила в теплые летние сезоны, в то время как в холодные летние сезоны наблюдалась стабильность дневной поверхности или небольшое пучение, при этом на Чукотке за этот же период поверхность опустилась в 4 раз сильнее. В Большеземельской тундре тренд увеличения СТС составляет 1 см/год, при этом осредненная просадка поверхности за 1999-2023 гг. в сумме составила 36 см. Результаты исследований свидетельствуют о недооценке ранее выявленных темпов деградации ММП в этих районах (например, Maslakov et al., 2019) и переосмыслению механизма взаимодействия атмосферы, СТС и переходного слоя ММП на фоне устойчивого тренда к потеплению климата высоких широт. Наблюдения показывают, что для площадки CALM R27 (Чукотка) переходный слой в периоды относительного понижения летней теплообеспеченности не восстанавливается, как считалось ранее (Каневский, 2003), а продолжает оттаивать, но с заметно меньшей скоростью, чем в периоды жарких летних сезонов.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что величина сезонных и межгодовых колебаний отметок дневной поверхности является не менее важным параметром при мониторинге геокриологических условий, чем мощность СТС и температура ММП.

Исследования на Чукотке выполнены в рамках проекта РНФ №23-77-01016 «Трансформация криогенных ландшафтов приморских равнин Чукотки на фоне изменений климата». Исследования на севере ЕТР были выполнены при поддержке темы гос. задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 125021902454-1. Многолетние полевые наблюдения были выполнены при поддержке проекта Circumpolar Active Layer Monitoring №1836377.

Каневский М.З. Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений северной Якутии: Автореф. дис. … канд. геол.-мин. наук. М., 2004, 23 с.

Maslakov, A., Shabanova, N., Zamolodchikov, D., Volobuev, V., & Kraev, G. (2019). Permafrost degradation within Eastern Chukotka CALM sites in the 21st century based on CMIP5 climate models // Geosciences, 9(5), 232.

Streletskiy, D. A., Maslakov, A., Grosse, G et al. Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere-review and perspectives // Environmental Research Letters, 2024, 1(20), 013006.

ТРЕНДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ПОРОД КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Г.Е. Облогов, Г.В. Малкова, А.А. Васильев
Институт криосферы Земли, Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень
oblogov@mail.ru

Изучение закономерностей геокриологических условий занимает одно из ключевых мест в системе мониторинга криолитозоны. Одним из основных показателей состояния криолитозоны является температурный режим многолетнемерзлых пород (ММП).

В настоящее время наблюдается чётко фиксируемое увеличение температуры приземного воздуха. С конца 1970-х годов глобальная температура воздуха возросла с 0.2 до 1.3 °С по сравнению со средними значениями 1850–1900 годов. Потепление климата в Арктике происходит в несколько раза быстрее, чем в среднем по планете. Деградация мерзлоты из-за глобального потепления в Арктике стала актуальной проблемой. ММП играют важную роль в изменениях климатической системы, в частности, в балансе парниковых газов и влиянии на арктические экосистемы и условия природопользования в этих регионах.

Сеть действующих метеостанций в Российской Арктике позволяет получать непрерывные ряды данных по основным климатическим параметрам, играющим ключевую роль в формировании температурный режима пород. Для оценки потепления в западном секторе Российской Арктики были собраны данные среднесуточной температуры воздуха по 9 метеостанциям и рассчитаны среднемесячные и среднегодовые значения, по которым рассчитаны уравнения линейной регрессии за 30-летние периоды 1961-1990, 1971–2000, 1991–2020 гг. Угловой коэффициент регрессионного уравнения определяет тренд хода температуры воздуха, представленный в °С/год. По полученным трендам в геоинформационной системе (ГИС) QGIS была проведена интерполяция значений и построены оценочные карты распределений трендов повышения температуры воздуха (рис. 1).

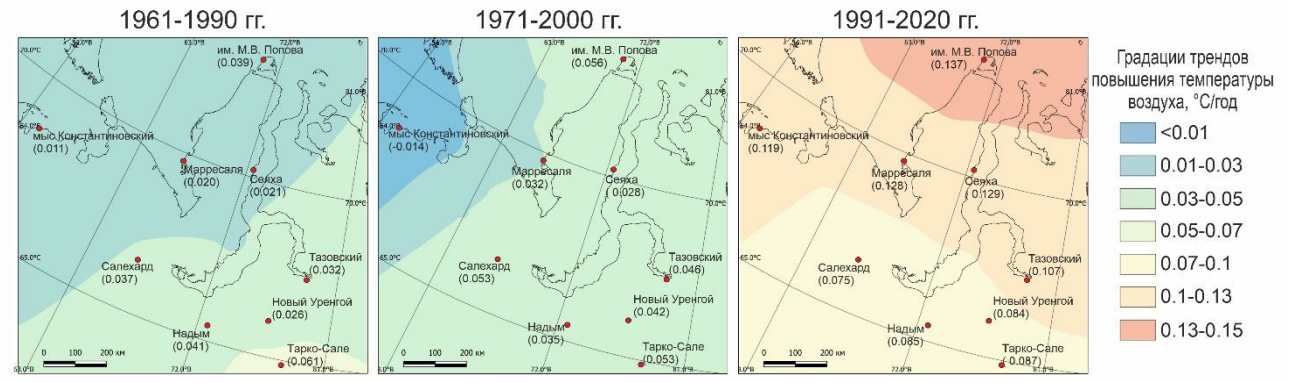


Рис. 1. Карты-схемы пространственного изменения трендов среднегодовой температуры воздуха западного сектора Российской Арктики.

Видно повсеместное возрастание трендов повышения температуры воздуха и их существенное пространственное перемещение. Наибольше темпы потепления характерны для северной арктической зоны. Такое перемещение центра климатического потепления к Арктическому побережью послужило одной из причин активизации негативных процессов в мерзлых толщах в 21 веке - существенному повышению температуры ММП, увеличению глубины сезонного протаивания, частичному оттаиванию мерзлоты сверху с образованием участков несливающейся мерзлоты.

Данные по температурному режиму ММП в западном секторе Российской Арктики были собраны и проанализированы для геокриологических стационаров Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, расположенных в биоклиматических зонах севера Западной Арктики от типичной тундры до северной тайги. Полученные данные позволили оценить текущее термическое состояние криолитозоны и проанализировать отклик многолетней мерзлоты на климатические изменения как в пределах различных биоклиматических зон, так и в различных криогенных ландшафтах. Расчет трендов производился на разных глубинах за период 2008-2023 гг. для всех участков, где имеются достаточно длительные ряды наблюдений. Наблюдается однозначный процесс повышения среднегодовой температуры ММП, однако имеются различия в темпах этого повышения, что приводит к общему сокращению диапазона изменения температуры ММП по всей территории.

В зоне северной тайги Западной Сибири (стационар Надымский, островное распространение ММП) и лесотундры (стационар Южный Уренгой, прерывистое распространение ММП) в настоящее время температура ММП на глубины 10 м колеблется от -1.0 до -0.1° С, темп потепления мерзлоты в среднем составляет около 0.01°С/год. Сезонные колебания температуры наблюдаются до глубины 3-4 м, а ниже не превышают ±0.1°С, температурный режим ММП является квазистационарным. На Европейском севере (стационар Болванский, сплошное распространение мерзлоты) в настоящее время температура пород на глубине 10 м изменяется в интервале от -1.3 до -0.6 °С. В зависимости от ландшафтных условий тренд повышения температуры ММП изменятся от -0.01 до 0.08 °С/год. Незначительный отрицательный тренд характерен для ландшафтов торфяников. Текущий температурный режим пород здесь приводит к образованию несквозных таликов мощностью до 5-6 м в понижениях рельефа и на закустаренных участках. В Западной Сибири (стационар Северный Уренгой, южная тундра) темп потепления мерзлоты в среднем составляет около 0.06°С/год, температура мерзлоты в зависимости от ландшафта составляет сейчас от -3.4 до -0.6 °С. Температурные различия между криогенными ландшафтами сокращаются. Здесь наблюдается формирование несквозных таликов на нарушенных участках. Воздействие климатического потепления на температурный режим ММП стало проявляться и в типичной тундре Западной Сибири в области сплошного распространения ММП (стационар Марре-Сале, Западный Ямал). Температурный режим во всех криогенных ландшафтах меняется. Наибольшие темпы потепления мерзлоты (до 0.17 °С/год на глубине 2 м и 0.11 °С/год на глубине 10 м) характерны для хорошо дренированных ландшафтов на высоких геоморфологических уровнях, с преимущественно песчаным составом пород и с разряженным, либо отсутствующим растительным покровом. Тем не менее мерзлота в зоне типичной тундры ещё остается низкотемпературной с диапазоном изменения -3.0…-5.0 °С, а ее состояние – стабильным.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0005).

МОНИТОРИНГ АНМАНГЫНДИНСКОЙ НАЛЕДИ МЕТОДОМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ В 2021–2023 ГГ.

Осташов А.А., Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Землянскова А.А., Жунусова О.Р.
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
andrey.ostashov@gmail.com

Мониторинг наледей необходим для фиксации изменений, происходящих внутри года и на более длительном интервале времени. Сложность использования наземных контактных методов исследования обуславливается высокими трудовыми и материальными затратами, что позволяет отдавать предпочтение более современным методам. Метод аэрофотосъемки позволяет без взаимодействия с объектом с высокой скоростью производить мониторинг больших объектов (Grib, 2020; Gagarin, 2020). При использовании глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), встроенных в беспилотный летательный аппарат, точность определения морфометрических характеристик наледи может быть расценена как достаточная.

Мониторинг методом аэрофотосъемки (АФС) проводился на Анмангындинской наледи, расположенной в Магаданской области на 155 км Тенкинской трассы. За период с 2021 по 2023 гг. выполнена 21 съемка в период нарастания и разрушения наледи. Съемка производилась беспилотным летательным аппаратом DJI Phantom 4 pro v.2, модернизированным ГНСС оборудованием. По результатам каждой съемки был получен ортофотоплан, позволяющий дешифрировать контур наледи для определения ее площади (для летних съемок). Для определения границ наледи на зимних ортофотопланах вспомогательными являлись данные наземных наблюдений, представляющих из себя поперечные профили съемки ГНСС приемником с уточнением подстилающей поверхности земля/лед. Для АФС с корректными данными по геодезии была рассчитана ЦМР, позволяющая определить объем наледи (методом сравнения растра с наледью и без наледи).

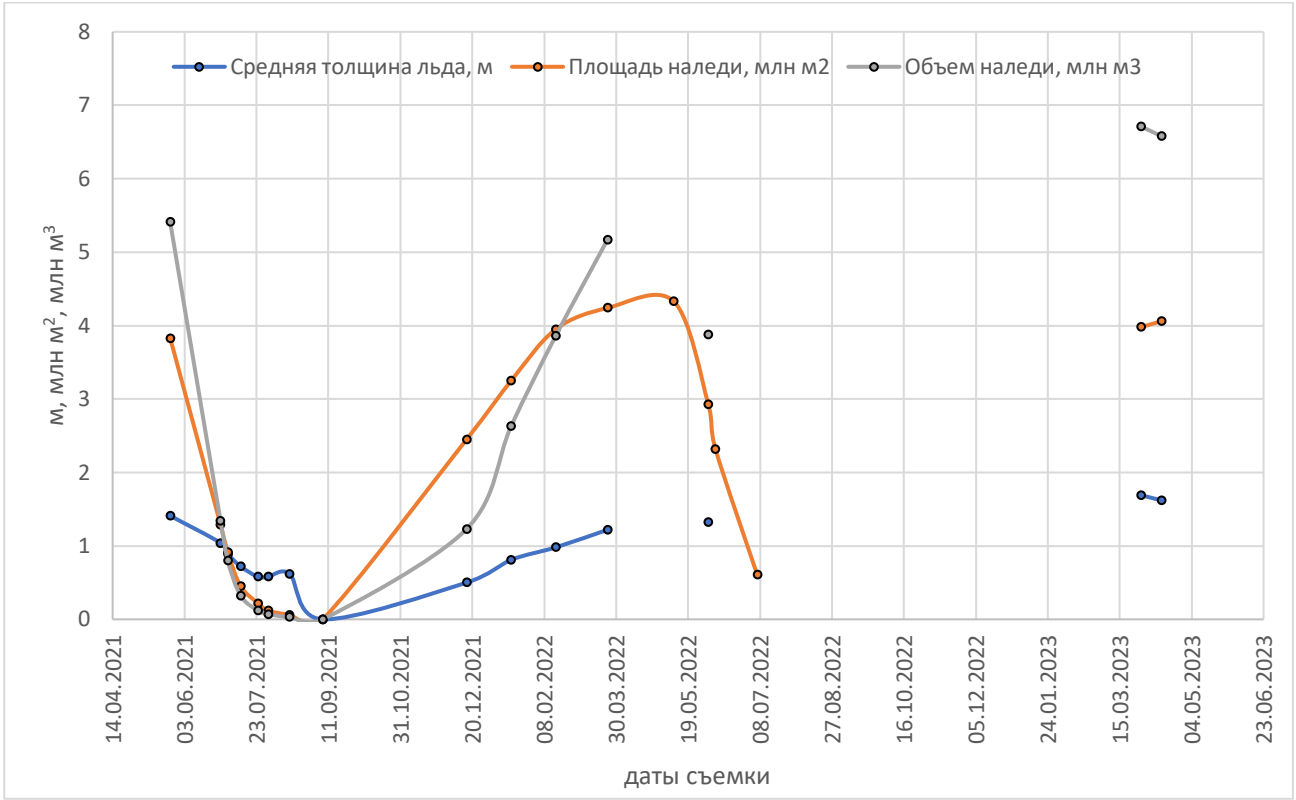


Рис. 1. Сводный график морфометрических характеристик, определенных по результатам обработки АФС за 2021-2023.

На рисунке 1 представлены площадь, объем и средняя толщина наледи, рассчитанные по результатам АФС за 2021-2023 гг.

На основе наземных наблюдений ГНСС приемником, произведенных смежно с АФС, был произведен расчет точности метода. Средняя погрешность определения средней толщины наледи

после выявления и корректировки систематической ошибки составляет 11%, что позволяет говорить о перспективности метода для мониторинга за нарастанием и стаиванием наледи.

Исследование проведено при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата» (ID PURE 103963992).

Gagarin, L., Wu, Q., Melnikov et al. Morphometric Analysis of Groundwater Icings: Intercomparison of Estimation Techniques // Remote Sens, 2020 – 12, 18 https://doi.org/10.3390/rs12040692

Grib N., Melnikov A., Grib G. et al. Use of unmanned aerial systems for assessing the dynamics of hazardous engineering and geocryological processes on linear facilities. E3S Web Conf., 192 (2020) 04006 DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/2020192040

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ И ИЗМЕНЕНИЕ ЗЕЛЕНОЙ БИОМАССЫ В ТИПИЧНОЙ ТУНДРЕ ЗАПАДНОГО ЯМАЛА

Самохвалов Н.Д [1], Васильев А.А.[2]
[1] МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
[2] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень
samohvalov.nd@yandex.ru

Оценка реакции многолетнемерзлых пород на глобальные изменения климата выдвинута в ряд приоритетных в ближайшие десятилетия. Для составления прогнозов дальнейшего состояния мерзлоты и принятия на их основе решений необходимо понимание процессов влияющих на реакцию мерзлых пород.

Установлено, что реакция мерзлой толщи на климатические изменения отличается в регионах криолитозоны во времени и пространстве и главным образом зависит от ландшафтной структуры и криогенного строения пород. Реакция многолетнемерзлых пород на потепление климата в Арктике выражается в увеличении глубины сезонного протаивания пород, увеличении среднегодовой температуры мерзлых пород и активации деструктивных криогенных процессов. В связи с этим, важное значение приобретают исследования, основанные на данных долговременных наблюдений, полученные по единой методике в разных ландшафтах криолитозоны.

На фоне современных изменений климата на ключевом участке, расположенном на Западном Ямале, на территории геокриологического стационара Марре-Сале, как и во всей Западной Арктике наблюдается общий тренд деградации многолетнемерзлых пород, проявляющийся в увеличении глубины сезонного протаивания и повышению среднегодовых температур пород. Данная реакция происходит на фоне наблюдаемых трендов увеличения среднегодовых температур воздуха, температур теплого и холодного периодов, а также продолжительности самого теплого периода.

В рамках данного исследования были проанализированы натурные наблюдения за глубиной сезонного протаивания с 1978 по настоящее время. Установлено, что реакция на потепление климата в различных урочищах на ключевом участке различна. Существуют урочища как с крайне положительным и усиливающимся во времени трендом сезонного протаивания, так и те урочища, которые находятся квазистационарном состоянии и даже демонстрирующие отрицательный тренд протаивания. Увеличение глубины сезонного протаивания наблюдается в дренированных ландшафтах: песчаных раздувах, дренированных тундрах и плоскобугристых торфяниках. Увлажненные и болотные ландшафты находятся в квазистационарном состоянии на протяжении исследуемого периода, и практически не реагируют на изменения климата. Это может быть объяснено увеличивающимся во времени количеством осадков (в том числе в виде снега), изменяющимся во времени растительным покровом и осадкой поверхности при оттаивании, непосредственно влияющей на измерение величины сезонного протаивания.

Известно, что в следствие потепления климата происходит увеличение теплообеспеченности ландшафтов, что приводит к улучшению условий для роста и развития растительных покровов. В рамках данного исследования для каждого типа урочищ была проанализирована динамика зеленой биомассы на основе индекса NDVI по данным космических снимков Sentinel-2 в период с 2016 по 2023 год. Установлено, что на фоне потепление климата значения NDVI в каждом типе урочищ увеличиваются, что свидетельствует о росте зеленой биомассы.

Увеличение мощности зеленой биомассы, обладающей низкой теплопроводностью приводит к замедлению темпов протаивания, что подтверждается данными натурных наблюдений. Глубина сезонного протаивания имеет устойчивую связь со значением NDVI и экспоненциально возрастает по мере уменьшения значения NDVI. Коэффициент детерминации R^2 равен 0,76.

Таким образом проведенное исследование на примере ключевого участка на западе п-ова Ямал подтверждает реакцию вечномерзлых пород на современные изменения климата выраженную в виде увеличения глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых пород. На основе полевых измерений и ландшафтно-мерзлотной съемки подтверждена зависимость глубины сезонного протаивания от ландшафтных характеристик, определены многолетние тренды глубины протаивания в каждом типе урочищ и дана их статистическая характеристика.

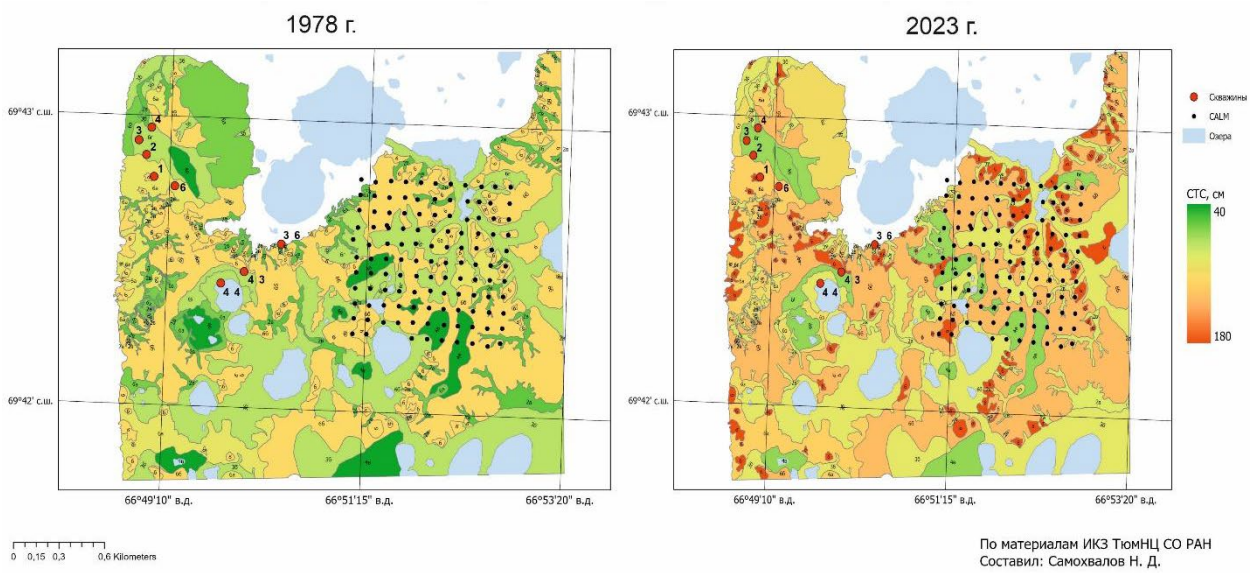


Рисунок. 1. Глубина сезонного протаивания в урочищах геокриологического стационара Марре-Сале в 1978 и 2023 гг.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0005).

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ЯКУТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Семенов В.П., Мисайлов И.Е.
ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
semenov.vp@rambler.ru

Якутская алмазоносная провинция – крупнейшая алмазоносная провинция в стране по разведанным запасам. Она расположена в северо-восточной части Сибирской платформы, в западной части Якутии, в бассейнах рек Вилюй, Муна, Оленек и др., занимая площадь около 1 млн. км^2. Включает в себя Центральносибирскую и Лено-Анабарскую алмазоносные субпровинции.

В разные годы, начиная с конца 1950-х годов, геокриологическими и гидрогеологическими проблемами алмазоносной провинции занимались, привлекаемые производственными организациями (в н.в. АК «АЛРОСА») различные научно-исследовательские академические организации, такие как: Институт мерзлотоведения СО РАН, Институт Земной коры СО РАН, ООО «Геостройпроект», Институт химии нефти СО РАН, и др. В результате выполнения этих исследований было выявлено, сложное вертикальное строение мерзлой толщи. По характеру льдораспределения ее подразделили на два горизонта: верхний – собственно многолетнемерзлая толща мощностью 200-300 м, содержащая воду в виде льда, и нижний (охлажденный) - насыщенный криопэгами (Ефимов, 1959; Ломоносов, 1962; Устинова, 1961).

В геотермическом же плане рассматриваемая территория изучена неравномерно. Более детально исследованы Ботуобинская седловина и южный склон Анабарской антеклизы, в пределах которых в течение последних 50 лет ведется освоение коренных месторождений алмазов: трубки «Мир», «Интернациональная», «Айхал», «Сытыканская», «Юбилейная», «Удачная», «Зарница» и другие.

С 2022 г сотрудниками Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова в рамках сотрудничества с Институтом «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО) проводятся комплексные региональные геотермические исследования рассматриваемой территории. Целью которых является исследование и оценка современного состояния геотемпературных полей криолитозоны Якутской алмазоносной провинции.

На данный момент комплексные геотермические исследования выполнены в трех алмазоносных районах: Мало-Ботуобинском, Средне-Мархинском и Далдыно-Алакитском. По полученным данным составлены сводные температурные кривые по отдельным районам (рис.1).

В ходе проведения геотермических исследований получены новые данные и выявлены особенности современного геотемпературного поля и криолитозоны рассматриваемой территории. В характере температурных кривых в интервале отрицательных значений температур отмечаются 3 области с различным знаком и значением геотермического градиента: 1 – Область с отрицательным градиентом; 2 – безградиентная или слабоградиентная область; 3 – область с положительным градиентом в интервале отрицательных значений температуры горных пород.

Установлена неоднородность геотемпературных полей криолитозоны, обусловленная сложностью природно-климатических условий, структурно-тектоническим строением, разностью состава и свойств горных пород, слагающих регион. Температура пород на подошве слоя годовых теплооборотов изменяется от положительных значений (+0,4) до -6,4 °С, при этом минимальные значения температуры фиксируются в интервале глубин 50-280 метров.

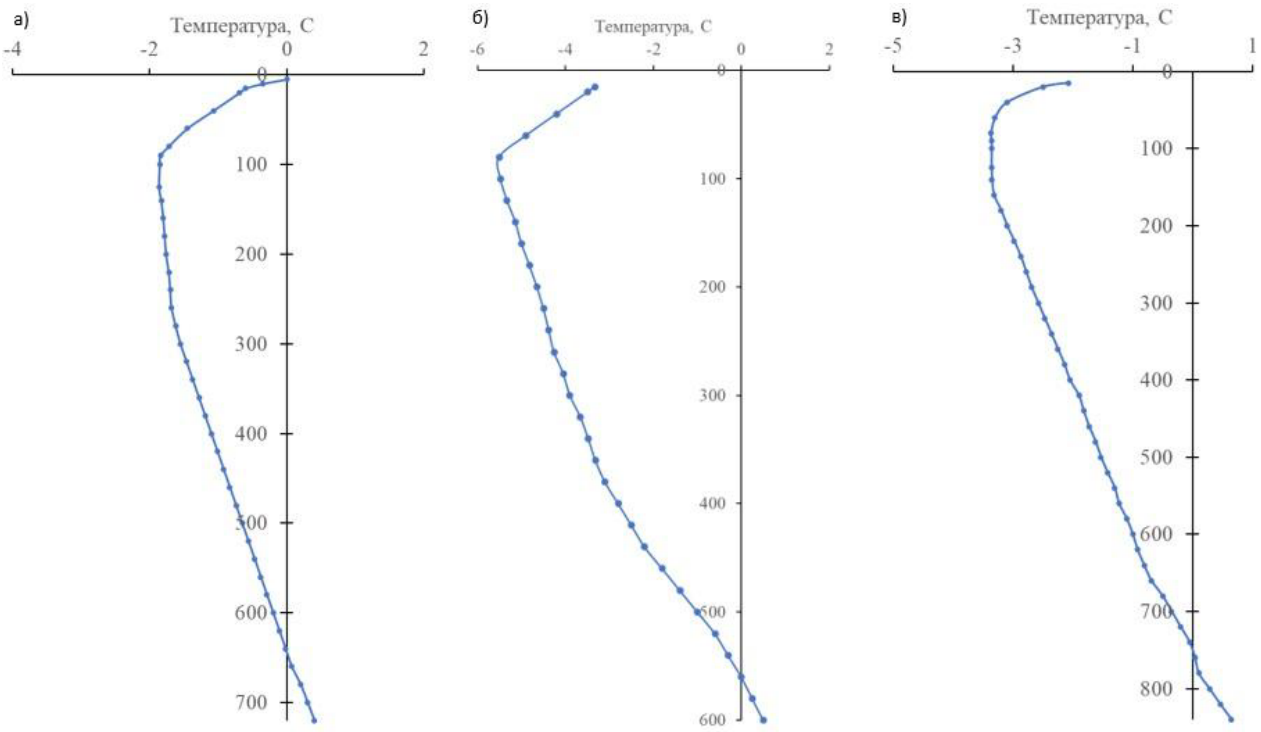


Рис.1. Графики сводных температурных кривых глубоких горизонтов. (алмазоносные районы: а) – Мало-Ботуобинский; б) – Далдыно-Алакитский; в) – Средне-Мархинский).

Проведенная региональная оценка повышения температуры пород на подошве слоя годовых теплооборотов (15 метров) показала значения от 1,0 до 2,0 ºС, что согласуется с фактическими данными, полученными по скважинам Далдыно-Алакитского района (месторождение трубка «Удачная»), где за период с 1990-х по 2024 гг. она повысилась на 1,2-2,2 ºС. Наблюдаемый процесс формирования отрицательного градиента температуры горных пород в верхних горизонтах литосферы на наш взгляд обусловлен наложением техногенного фактора на глобальное изменение климата.

Криолитозона региона имеет сложное вертикальное строение, осложнена наличием высокоминерализованных меж- и подмерзлотных вод (рассолов). Оцененная и установленная современная мощность в пределах исследуемого региона изменяется в широких пределах от 400 до 800 метров. Мощность же многолетнемерзлой толщи варьирует от 100 до 650 метров, и повсеместно контролируется кровлями подмерзлотных водоносных комплексов с высокоминерализованными водами (рассолами).

Ефимов А.И. Гидрогеологические особенности района месторождения алмазов трубки "Мир" в юго-западной Якутии // Труды II совещания по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири. - Иркутск, 1959. - Вып. II. - С.79-87.

Ломоносов И.С. Вертикальная гидрогеохимическая зональность в районе месторождения алмазов трубки "Мир" // Труды Восточно-Сибирского геология. ин-та СО АН СССР. - Иркутск, 1962. - Вып.9. - С.103-117.

Устинова З.Г. Особенности мерзлотно-гидрогеологических условий алмазного месторождения трубки "Удачная" // III совещание по подз. водам и инженерной геологии Сибири, и Дальнего Востока (тезисы докл.). - Иркутск, 1961. - Вып.2 - С.108-109.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ

Сергеев Д.О.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), Москва
d.sergeev@geoenv.ru

На территории криолитозоны лица, принимающие решения, и инженеры сталкиваются со спецификой развития природно-техногенных процессов, воздействующих на объекты инфраструктуры. Долгосрочный прогноз активности таких процессов необходим при территориальном комплексном планировании, и оценках качества и количества природных ресурсов. Средне- и краткосрочные прогнозы подготавливаются для оценки уязвимости локальных реципиентов воздействия (здания, дороги, трубопроводы и т.п.) и устойчивости хозяйственной деятельности. Среднесрочный прогноз необходим также для подготовки рекомендаций по оптимизации инженерной защиты территории. Однако идентификация геокриологических процессов, требующих прогноза, опирается на понимание существующей или потенциальной опасности, связанной с ними. Таким образом, характеристика опасности является необходимым шагом прикладных исследований.

Разработанность частных аспектов темы исследований относительно высока. Геокриологические процессы рассматриваются с точки зрения их опасности для хозяйственной деятельности во многих работах в России и за рубежом (Основы геокриологии, 2008; Péwé, 1993; Зотова, Тумель, 1999; Геокриологические опасности, 2000; Тумель, Зотова, 2017; Nelson et al, 2002; Kääb, 2008; Hayley & Horne, 2008). Однако на практике сохраняется проблема оптимизации хозяйственной деятельности на территории криолитозоны, обусловленная несогласованностью методов и сроков проведения изысканий и других видов натурных исследований с темпами освоения территории. Кроме того, цифровизация результатов исследований в отраслях науки о Земле нуждается в осмысленном структурировании, которое основана на понимании существа понятий «состояние вечной мерзлоты» и «динамика вечной мерзлоты».

Различают пространственную и временну́ю неоднородности геокриологических условий. Главной причиной пространственной неоднородности являются процессы, протекавшие в прошлом и оставившие свой след в виде реликтовых геокриологических явлений и отразившихся в распределении водно-физических и физико-механических свойств грунта. Причиной временно́й неоднородности геокриологических условий являются внешние «управляющие» воздействия на режим теплообмена и криолитологические тела, вызванные изменениями режима техногенных воздействий, а также эволюцией климата и экосистем (Кудрявцев, 1983; Shur & Jorgenson, 2007). Эти изменения могут характеризоваться как тенденции или как события. Под тенденциями в данном случае понимается устойчивое изменение усреднённых временных характеристик в течение периода более трёх лет. Разовые события подразумевают однократные воздействия, длительность которых не превышает одного сезона, например, аномальные погодные явления, снятие растительного покрова.

Факторами геокриологических опасностей являются климатические, гидрологические, геоботанические и геологические природные или антропогенно обусловленные события, при наступлении которых меняются условия теплообмена в горных породах или на земной поверхности.

Кажущаяся хаотичность территориальной приуроченности хозяйственных проблем, связанных с развитием геокриологических процессов, обусловлена тем обстоятельством, что их существенная часть возникает как реакция геокриологических условий и криогенных процессов на техногенные воздействия, а другая часть – как результат воздействия природных процессов, активность которых имеет зональные и секториальные закономерности (Кудрявцев и др., 1979).

Методы оценки опасностей комбинируются в соответствии со структурой понятия «геокриологическая опасность» (рис. 1).

Первой стадией оценки является идентификация, т.е. доказательство, что опасность существует (даже если она не проявлена) и имеет геологические границы. На этом этапе преимущественно используется мерзлотная съёмка и данные комплексного мониторинга (геотехнического, геокриологического, экологического).

Второй стадией оценки опасностей является качественная и количественная характеристика их степени (отдельно для каждого криогенного процесса), которая выполняется преимущественно на основе специального районирования природно-технических систем и комплексного мониторинга.

Третья стадия оценки призвана характеризовать динамику опасности и опирается на геокриологический прогноз каждой из составляющих природно-технической системы, верифицируемый по данным мониторинга. При этом содержанием прогноза является моделирование

температурного поля грунтового массива и сопряжённый с ним прогноз напряжённо-деформированного состояния грунта и технических конструкций.

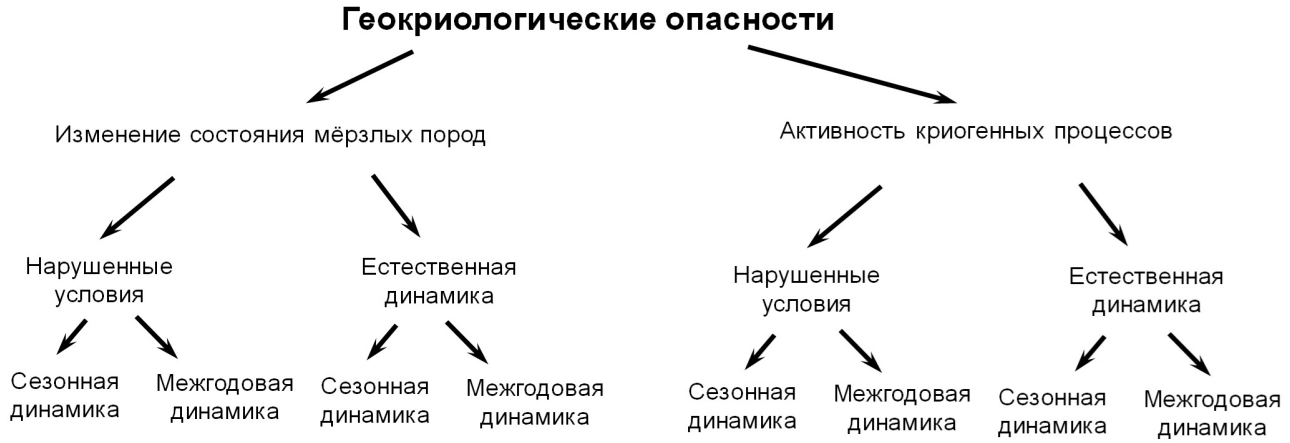


Рисунок. 1. Структура понятия геокриологической опасности.

Адаптация хозяйственной деятельности на территории криолитозоны должна опираться на пространственное выделение участков с неблагоприятным криолитологическим строением (пространственная составляющая опасности), и с меняющейся во времени вероятностью развития криогенных процессов, зависящей от климатических изменений и режима техногенной нагрузки (временная составляющая опасности). «Пространственный» риск может быть уменьшен за счёт улучшения качества предпроектных инженерных изысканий, а «временной» риск – путём использования методов геокриологического прогноза, а также благодаря оперативному реагированию на ухудшение геокриологической ситуации, отслеживаемой при геотехническом мониторинге в ходе эксплуатации сооружения.

Комплексный пространственный и временной анализ геокриологических опасностей рекомендуется основывать на соединении материалов мерзлотной съёмки с результатами прогнозного математического моделирования температурного режима многолетнемёрзлых толщ, которое калибруется и верифицируется по ретроспективным расчётам с использованием сопряжённых данных климатического, экологического, геокриологического и геотехнического видов мониторинга. Локальные прогнозы взаимодействия вечной мерзлоты с техническими объектами основываются на входных данных, получаемых при мелкомасштабном региональном прогнозе изменения фоновых геокриологических условий.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КРОВЛИ ММП НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА И ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М., Малкова Г.В., Дроздов Д.С.
Институт криосферы Земли Тюменского научного центр Сибирского отделения РАН (ИКЗ ТюмНЦ СО РАН), Тюмень (Москва)

На современном этапе, характеризующимся понижением кровли многолетнемерзлых пород (ММП) в результате глобального потепления, использование геофизических методов для определения и мониторинга ее положения в пространстве становится весьма актуальным и востребованным.

По сравнению с традиционными геокриологическими методами, оперирующими данными о кровле ММП лишь в отдельных точках геологической среды, полученными с помощью щупа или скважины, геофизические методы обладают несомненными преимуществами. Они обеспечивают получение информации высокой детальности об изменчивости глубины кровли ММП в пределах профилей или площадей необходимых размеров.

Среди геофизических методов сейсмические обладают рядом преимуществ. В условиях песчано-глинистого разреза **для водонасыщенных пород** имеются надежные сейсмические критерии [1], обеспечивающие практически однозначную идентификацию мерзлого состояния пород любого литологического состава. Поэтому при отсутствии данных бурения о положении в разрезе кровли ММП результата сейсмических исследований могут быть использованы в качестве опорных данных при интерпретации результатов других геофизических методов.

В докладе рассматриваются результаты сейсмического мониторинга за положением кровлей ММП на двух участках [2].

Участок Кумжа расположен в пойме р.Печора. Наземные исследования по заложенной сети наблюдений проводятся на нем с 2014 года.

По данным режимных сейсмических наблюдений за период с 2015 по 2023 год средняя годовая глубина ММП увеличивалась на 0.29м. а за период с 2023 по 2024 гол уменьшилась на 0.52м. Объясняется это тем, что в предыдущие годы наблюдения выполнялись в последней декаде августа - первой декаде сентября. Работы в 2024 были начаты на месяц раньше. Полученные данные дают сделать обоснованный вывод, что на фоне общего понижения кровли ММП, она испытывает сезонные разнонаправленные колебания в течение года.

Два цикла режимных сейсмических исследований выполнено в южной части Уренгойского месторождения. Результаты наземных наблюдений подтверждены скважинными сейсмическими исследованиями и термометрией. При этом достоверность определения положения кровли ММП сейсмическими методами в условиях высокотемпературного разреза по данным ВСП выше, чем у термометрии. Глубина кровли ММП за 10 лет увеличилась на 1.8 – 3.8 м.

Сейсмический мониторинг кровли ММП особенно эффективен в условиях интенсивного техногенного воздействия [2] на окружающую среду. При наличии домов и сооружений на участках исследований, построенных на свайных основаниях с проветриваемыми подполями, возможно получение информации о глубине кровли ММП непосредственно под зданиями [3].

В зависимости от поверхностных условий сейсмический мониторинг может выполняться как с преломленными, так и с отраженными сейсмическими волнами. Однако приоритет следует отдавать использованию поперечных SH-волн горизонтальной поляризации.

1. Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород. Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, №2, с.83-90.
2. Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А., и др. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге. Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2022. – № 6. – С. 141-151. EDN YHINGG. https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-6-141-151.
3. Скворцов А.Г., Царев А.М., Садуртдинов М.Р. Методические особенности изучения сейсмогеокриологического разреза. Криосфера Земли, 2011, т.XV, №4, с.110-113.

CIRCUMPOLAR ACTIVE LAYER MONITORING IN THE XXI CENTURY

Streletskiy Dmitry and Nikolay Shiklomanov
Department of Geography and Environment, George Washington University, Washington DC, USA
strelets@gwu.edu

The active layer (uppermost soil horizon in permafrost system) undergoes seasonal freezing and thawing cycles. Active layer thickness (ALT) is one of the three products currently supporting permafrost Essential Climatic Variable (ECV) according to the Global Climate Observing System (GCOS). ALT monitoring is essential for understanding the long-term dynamics and ecosystem response of permafrost to changing climatic conditions, landcover, and landuse. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program, established in the early 1990s, is part of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P), the primary international program concerned with ALT changes worldwide (Brown et al., 2000; Nelson et al., 2021). Almost half of active CALM sites are located in Russia. Russian CALM network plays an essential role in understanding the global climate and environmental systems. Here we present generalized long-term trends of the active-layer thickness as observed by the CALM program participants in diverse Arctic, Antarctic, and High Elevation regions (Figure 1).

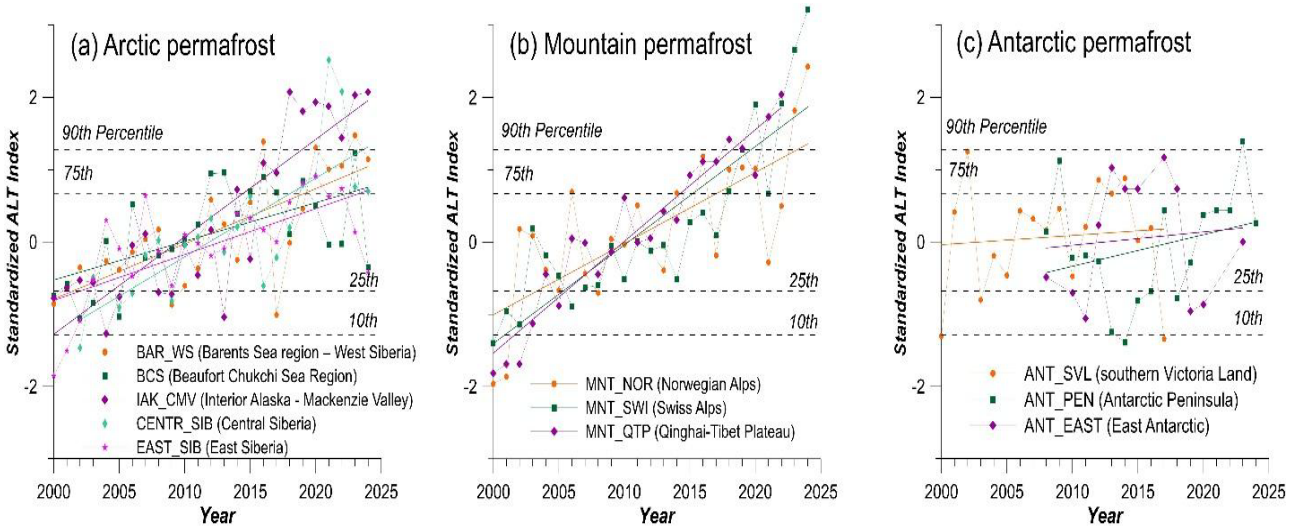


Figure 1. Standardized index of active layer thickness (ALT) relative to 2000–2020 baseline. (a) Arctic regions: Beaufort Chukchi Sea – Arctic Alaska and Mackenzie Delta region (BCS), Interior Alaska and central Mackenzie Valley, Northwest Territories (IAK_CMV), Barents Sea region – West Siberia (BAR_WS), Central Siberia (CENT_SIB), East Siberia (EAST_SIB); (b) Mountain regions: Norwegian mountains (MNT_NOR), Swiss Alps (MNT_SWI), Qinghai-Tibet Plateau (MNT_QTP); and (c) Antarctic: southern Victoria Land (ANT_SVL), Antarctic Peninsula (ANT_PEN), East Antarctic (ANT_EAST).

The results show varying but generally increasing ALT trends in all regions from 2000 to 2024. The mountain permafrost of Europe and China is characterized by the highest rates of ALT increase. The moderate increases are found in discontinuous permafrost of North America and Eurasia. The smallest ALT trends are evident from observations conducted in cold continuous permafrost of Alaska, Canada, Antarctic Peninsula, and Northeast parts of Russia.

However, long-term ALT observations made relative to the surface may not adequately represent the total thermal response of the upper permafrost to climatic variability due to the frost heave and thaw subsidence. Vertical ground displacement observations conducted at several CALM sites indicate a long-term surface subsidence resulting in an underestimation of thaw penetration inferred from long-term ALT records (Streletskiy et al., 2025). The discrepancy between the thaw penetration and ALT increases with an increase in ground ice content, making an active layer less indicative of permafrost thaw in landscapes with the most potential for geomorphic effects induced by climate change. This emphasizes the need for expanding ground displacement observations and broader incorporation of thaw subsidence into analytical and modeling permafrost studies.

The primary rationale for establishing the CALM program in 1995 was to develop standardized thaw depth and active-layer observations for detecting changes in the permafrost system, for use in process studies, and for validating and developing hydrologic, ecosystem, permafrost, and climate models. 30 years

later the CALM continues to serve as the world's primary source of empirical information about the active layer, its spatial patterns, and temporal trends. As a global program, CALM maintains the open, community-based structure providing a platform for monitoring and analytical activities by all willing elements of the international permafrost-research community. Sustaining CALM monitoring and analytical activities by continuing and expanding existing international partnerships and collaborations is critical for the future success of the program.

Brown, J., Hinkel, K. M., & Nelson, F. E. (2000). The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: research designs and initial results. *Polar geography*, *24*(3), 166-258.

Nelson, F. E., Shiklomanov, N. I., & Nyland, K. E. (2021). Cool, CALM, collected: the Circumpolar Active Layer Monitoring program and network. *Polar Geography*, *44*(3), 155-166.

Streletskiy, D.A., Maslakov, A., Grosse, G., Shiklomanov, N., Farquharson, L.M., Zwieback, S., Iwahana, G., Bartsch, A., Liu, L., Strozzi, T. and Lee, H., 2025. Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere-review and perspectives. *Environmental Research Letters,* 20, 013006

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕЖИМНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ГОРАХ ВЕРХОЯНСКОГО ХРЕБТА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 15 ЛЕТ

Сысолятин Р.Г., Сериков С.И., Тихонравова Я.В.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, Якутск, Россия
e-mail robertseesaw@gmail.com

Температура зачастую выступает основным показателем, определяющим состояние массива горных пород и незасоленных грунтов. В условиях расчленённого горного рельефа температурная изменчивость горных пород и отложений имеет пёстрый характер. Многолетнемерзлые породы оказывают значительное влияние на гидрологию, геоморфологию и инфраструктуру, однако криолитозона северо-востока Евразии исследована неравномерно, и по сей день, крупные области в этом отношении остаются «белым пятном». Для характеристики геокриологических условий Восточной Якутии в 2010 году в долине р. Восточная Хандыга была заложена сеть режимных температурных наблюдений, которая затем в 2022 году, была расширена в рамках проекта «Восточно-Сибирская мерзлотная трансекта» (ESPT). На настоящий момент сеть насчитывает 21 участок проведения режимных наблюдений температуры воздуха, поверхности и горных пород на пути от 126 до 132 меридиана.

Для юго-западной части хребта Сунтар-Хаята температура воздуха в диапазоне 1000–1300 м на 3–4°С выше, чем в долинах, что связано с инверсией температуры. Однако зависимость между высотой и температурой грунта менее выражена. Температура в отложениях курумов близка к температуре воздуха, тогда как на локальных пиках температура пород повышается за счет солнечной радиации. На пойменных участках тепло грунтовых вод приводит к формированию таликов, однако зимнее промерзание достигает 5 м. На сильно увлажненных участках протаивание не превышает 0,5–0,6 м. Для глубины 1 м среднегодовая температура пород изменяется от -6 до -3°С, для поверхности характерны значения от -12 до -8°С, при среднегодовой температуре воздуха в долине -12°С. Основную роль в формировании температур ММП играют растительный и снежный покровы и увлажнённость поверхности, менее выражено влияние состава отложений, абсолютной отметки и экспозиции.

Получены первые результаты работы участков режимных наблюдений, приуроченных к зоне пролегания ФАД «Колыма» и прилегающих к ней территорий (Таблица 1). Наиболее суровая мерзлотная обстановка была установлена в горных районах Восточной Якутии. При средней годовой температуре воздуха от -14,5 до -12,0°С, температура на подошве сезонно-талого слоя может опускаться ниже -16°С. Средняя температура пород ниже глубины 3 м и до глубины слоя годовых теплооборотов (25–30 м) варьирует в пределах от -7,2 до -5,5°С. Для Центральной Якутии характерна меньшая глубина слоя годовых теплооборотов (до 9-11 м) с температурой на ней от -2,1 до -1,4°С. Геокриологические условия ФАД «Колыма» на отдельных участках (прим. уч. Тёплый Ключ) в пределах Предверхоянского прогиба, в следствии воздействия грунтовых вод и особенностей микроклимата, выделяются как наиболее уязвимые к риску изменения мёрзлого состояния основания насыпи автодороги. Среди всех участков режимных наблюдений здесь была установлена максимальная мощность сезонного оттаивания и высокая температура ММП на подошве годовых теплооборотов.

Установлена эмпирическая зависимость времени повторного замерзания СТС от срока начала залегания снежного покрова для долин Верхоянского хребта. Были рассмотрены три участка за 2022 и 2023 гг., проанализированы метеорологические данные по двум метеостанциям и определена логарифмическая связь двух событий, с коэффициентом корреляции $r^2=0,88$ (Рис. 1). В 72% случаев установление снежного покрова на высокогорной метеостанции Восточная происходило раньше 1 октября, следовательно срок повторного замерзания СТС может продлиться до второй-третьей декады ноября. Для Оймяконской котловины (м/с Томтор) снежный покров более 3 см устанавливается в середине октября, что в целом совпадает с моментом повторной заморозки СТС. На м/с Делянкир удалось установить аномально поздний срок образования снежного покрова – конец ноября, и наиболее раннее замерзание СТС – первая декада октября. В дальнейшем необходимо проанализировать связь мощности и строения СТС, влажности и растительного покрова с временем необходимым на сезонное оттаивание-промерзание.

Таблица 1. Параметры участков режимных наблюдений вдоль ФАД «Колыма» за 2023/24 гг.

Участок	Средняя многолетняя температура воздуха, °С	Мин. температура поверхности (0.2 м), °С	Температура на подошве слоя годовых колебаний, °С (глубина, м)	Мин. температура на подошве СТС, °С (глубина, м)	Средняя температура на опорной глубине, °С (амплитуда)		
					3 м	5 м	10 м
Якутск	-7,1	-22,6 (21.01.2024)	-1,4 (9 м)	-4,3 (2 м)	-1 (1,7)	-1,2 (0,3)	-1,4 (0,0)
Тёплый Ключ	-9,8	-12,4 (26.02.2023)	-0,8 (13 м)	-3,2 (4 м)	-1,1 (14,7)	-0,8 (2,7)	-0,7 (0,7)
Восточная	-12,0	-19,6 (18.02.2024)	- 6,1 (~20 м)	-12,5(2,5 м)	-6,0 (11,0)	-5,6 (7,0)	-5,9 (2,4)
Томтор	-14,0	-20,9 (26.02.2024)	-6,3 (30 м)	-16,3 (1,2 м)	-6,9 (0,5)	-6,8 (6,5)	-6,3 (1,5)
Оймякон	~ -14,0	-20,5 (26.02.2024)	-5,6 (30 м)	-13,6 (1,6 м)	-6,1 (9,5)	-5,9 (5,8)	-5,5 (1,7)
Делянкир	-14,5	-17,4 (19.02.2024)	-6,4 (25 м)	-15,5 (0,8 м)	-7,2 (8,0)	-7,2 (4,9)	-6,8 (1,1)

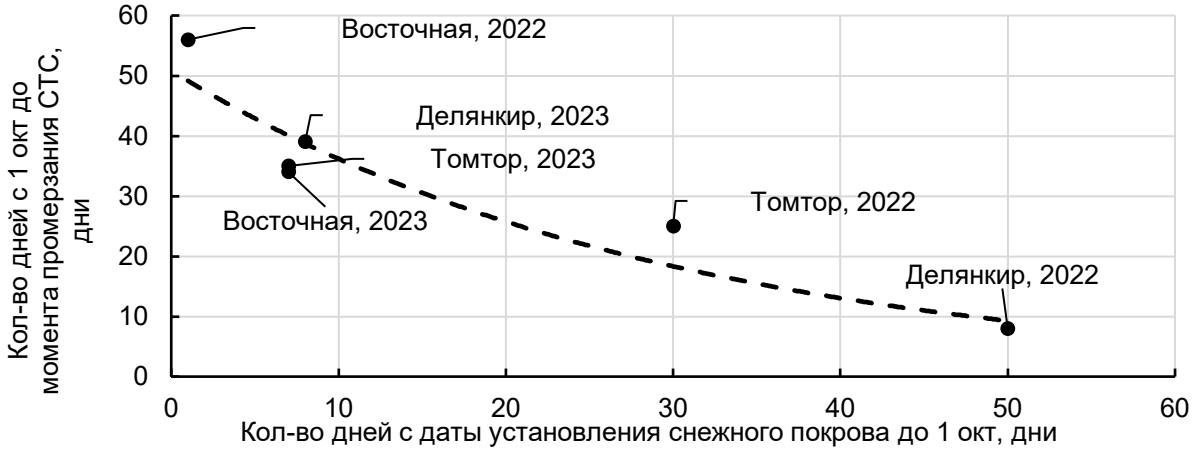


Рис. 1. Зависимость срока промерзания СТС от момента установления снежного покрова для Верхоянского региона.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ТАЗОВСКОГО ПОЛУОСТРОВА.

Хортюнова А.А.[1, 2], Гребенец В.И.[1], Курбатов А.С.[2], Лебедев М.С.[2], Соколова Т.Ю.[1,2]
[1] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2] ООО «Газпром добыча Ямбург», пос. Ямбург, Россия
vgreb@inbox.ru, AS.Kurbatov@yamburg.gazprom.ru, m.lebedev@yamburg.gazprom.ru, ty.sokolova@yamburg.gazprom.ru, a.hortyunova@yamburg.gazprom.ru

Происходящие климатические изменения в Арктическом регионе оказывают влияние на природные и геотехнические системы и создают новые вызовы для обеспечения устойчивости инфраструктуры, возведенной на многолетнемерзлых грунтах (далее – ММГ). В данной работе проведён анализ фондовых материалов [2] и результатов многолетних наблюдений в рамках проведения геотехнического мониторинга (далее – ГТМ), который позволил выявить тенденции климатических изменений и оценить их влияние на динамику температурного режима ММГ в центральной части Тазовского полуострова на территории Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения (далее – ЯНГКМ).

За период с 1986 по 2024 гг. на территории ЯНГКМ среднегодовая температура атмосферного воздуха повысилась на 3,6 °С (по данным метеостанций мыс Каменный и стационарной станции Газовый промысел № 2, ЯНГКМ). Повышение температур воздуха напрямую влияет на изменение температур ММГ - архивные данные и результаты ГТМ по фоновым скважинам естественных ландшафтов ЯНГКМ за период с 1979 по 2024 гг. показывают, что средняя температура ММГ повысилась с минус $3,1^0$С до минус $2,2^0$С (на глубине нулевых годовых амплитуд от 11 до 13 м).

Для оценки влияния климатических изменений на инженерные сооружения ЯНГКМ, выбрано три ключевых участка с различными условиями теплообмена на поверхности грунтов основания (вследствие принятых технических решений, различных по устройству фундаментов, условий снегозаносимости, затененности):

1. Сооружения из блок-понтонов на свайных фундаментах (высота между нижним днищем и поверхностью грунтов 30-40 см) с вентиляционными отверстиями – продухами, расположенными между их днищами. Блок-понтоны - это инженерные сооружения, созданные из отдельных модулей, соединенных между собой, и используемые как проветриваемые надфундаментные конструкции. При соблюдении режимов эксплуатации и расчистке снежного покрова, блок-понтоны создают оптимальные условия для формирования отрицательного температурного режима ММГ в зимний период, а в летний период препятствуют интенсивному поступлению теплых воздушных масс в проветриваемое подполье и одновременно являются навесами над грунтами, препятствующими проникновению солнечной радиации.

2. Сооружения на свайных фундаментах с вентилируемым подпольем (высота над поверхностью грунтов 100-150 см), которое обеспечивает циркуляцию воздуха под сооружением, без оказания отепляющего воздействия на ММГ. Условия теплообмена характеризуются в основном отсутствием снежного покрова и частичным затенением.

3. Сооружения на свайных фундаментах с формированием снежного покрова в основании (эстакады внутрипромысловых газопроводов, мачты связи и др.). Решающим фактором в формировании температурного режима ММГ в основании сооружений данного типа является характер снегонакопления.

Оптимальные условия теплообмена характерны для сооружений из блок-понтонов. Минимальные значения средней температуры грунтов в рабочем интервале свайного фундамента отмечаются в феврале-марте и составляют минус 7,5 – минус 10,4 °С. Максимальные температуры фиксируются в сентябре и составляют минус 2 – минус 3°С.

Температурный режим ММГ в основании сооружений на свайных фундаментах с вентилируемым подпольем характеризуется менее выраженными сезонными колебаниями и более высокими средними температурами. Минимальные значения средних температур достигаются в апреле-мае и составляют минус 1,7 – минус 3,1 °С, а максимума в сентябре со значениями минус 1,5 – минус 1,8 °С.

Высокие температуры ММГ и минимальные амплитуды сезонных колебаний характерны для эстакад внутрипромысловых газопроводов, в связи с интенсивным снегонакоплением в зимний период. Минимальные значения средней температуры грунтов приходятся на февраль и составляют минус 0,6 – минус 0,9 °С. Максимальные средние температуры отмечаются в сентябре и варьируются от минус 0,3 до минус 0,8 °С. На таких участках, из-за отсутствия ежегодного охлаждения могут наблюдаться слабовыраженные процессы деградации ММГ.

Таким образом, несмотря на то что рост температур ММГ отмечается во всех естественных ландшафтно-геологических условиях, темпы роста температур ММГ в основании инженерных сооружений остаются ниже (или равнозначны), что связано с их режимом эксплуатации и реализацией специальных мероприятий по стабилизации [1]. Температурный режим ММГ в основании сооружений характеризуется как более низкими (блок-понтоны), так и высокими (эстакады внутрипромысловых трубопроводов) средними температурами и в целом за период наблюдений характеризуется как стабильно удовлетворительный.

Анализ температур грунтов на рассматриваемых участках показал, что эксплуатационная надежность сооружений из блок-понтонов и с проветриваемым подпольем достаточно высокая, а фактические значения температур грунтов ниже значений по фоновым скважинам естественных ландшафтов. В основании большинства таких участков развиваются процессы аградации ММГ. Следует отметить положительный опыт эксплуатации сооружений из блок-понтонов. С точки зрения сохранения ММГ применение такого решения для сооружений, расположенных в криолитозоне, является уникальным, и создает существенный запас прочности на несколько десятилетий, без применения дополнительных управляющих решений.

Тем не менее, существующие в регионе тренды изменения климата создают риски деградации ММГ и развития опасных криогенных процессов. ГТМ – это важный инструмент, который позволяет отслеживать состояние ММГ, обеспечить устойчивость и надёжность сооружений на всех этапах жизненного цикла, своевременно принимать технические управляющие решения и прогнозировать состояние природно-техногенных систем.

1. Балтабаев Ш.Г., Серебряков Е.П., Лебедев М.С. Геотехнический мониторинг Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов//Инженерные изыскания. № 1. 2015. С. 64-69.

2. Петров Б. В., Стрелецкая И.Д., Рогов В. В., Курбатов А. С. Динамика температурного режима многолетнемерзлых пород Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения. Инженерная геология, Том XVI, № 3, С. 66–77.

5. ПОДЗЕМНЫЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ КРИОЛИТОЗОНЫ. ЛЕДНИКИ И ГЛЕТЧЕРЫ

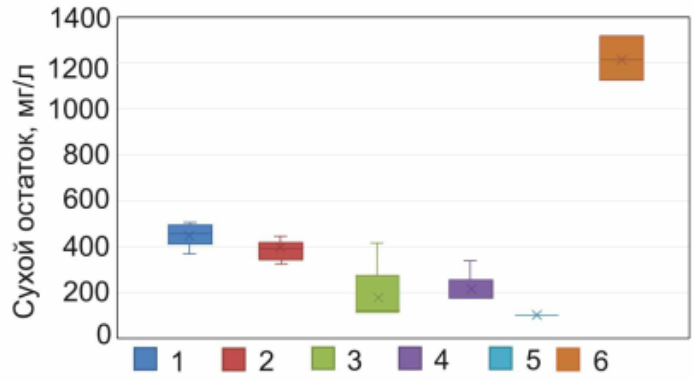
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ В АРКТИКЕ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА САЛЕХАРД

Башкова А.А.[1,2] Паламарчук В.А.[2],
[1] *ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», Салехард*
[2] *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень*
aabashkova@yanao.ru

Строительство зданий по I принципу с замораживанием изначально талых грунтов устройствами СОУ и применение проветриваемых подполий создают надежное мерзлое грунтовое основание, однако приводит к полному изменению геокриологических и гидрогеологических условий на территории застройки (Хрусталев, 2011). Ранее водовмещающие и водопропускающие грунты становятся ледогрунтовыми водонепроницаемыми заграждениями на пути естественного стока подземных вод (ПВ), что вызывает возникновение таких явлений, как: барражный эффект; подтопление участков с пониженным рельефом; растепление и размыв грунтового основания при сезонном повышении уровня ПВ и талыми водами. С целью принятия своевременных мер по исключению негативного влияния указанных явлений необходимо проводить регулярный гидрогеологический мониторинг зданий на протяжении всего срока их эксплуатации, организация и проведение которого нормативной документацией освящены недостаточно. Для разработки рекомендаций по организации и проведению автоматизированного гидрогеологического мониторинга для расчета и прогноза состояния грунтов основания объектов в криолитозоне в 2023 году сотрудниками ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» были начаты работы по комплексному изучению гидрогеологических условий территории города Салехард. На основе информации геологических фондов, были определены наиболее перспективные участки для изучения. На территории городской застройки и за ее пределами была организована сеть наблюдений, состоящая из 4-х гидрометрических створов на поверхностных водотоках и скважин различной глубины. За 2023-2024 гг. было пробурено 8 наблюдательных гидрогеологических скважин (ГС), 4 термометрические и 2 параметрические скважины (Рис. 1а). Глубины скважин изменялись от 10 м на первой до 26 м на четвертой надпойменной террасах.

Наблюдательными гидрогеологическими скважинами были охвачены следующие геоморфологические уровни: ГС-1, вскрывающая надмерзлотные подземные воды (НПВ), расположена на третьей озерно-аллювиальной террасе (la^3III); ГС-2 и ГС-3 расположены в пределах первой надпойменной террасы (a^1III-Н); ГС-7, расположенная также на la^3III, вскрывает водоносный горизонт приуроченный к межмерзлотным водам (МПВ); ГС-9 приурочена к первой надпойменной террасе (a^1III-Н), скважиной вскрыто два водоносных горизонта: первый - НПВ на глубинах 5,8-11,3 м; второй – МПВ на глубинах 22,0-25,0 м; ГС-12 вскрывает НПВ и расположена на четвертой надпойменной террасе (am^4III), представленной аллювиально-эстуарными отложениями (Грязнов и др., 2004).

Минерализация надмерзлотных вод в скважинах изменяется в пределах 90-600 мг/л. Минерализация вод межмерзлотного горизонта, вскрытого скважиной ГС-7, в 3 и более раз превышает минерализацию НПВ (Рис. 1б).



а б

Рис. 1. Места расположения скважин на территории города Салехард (а) и колебания минерализации подземных вод за 2023-2024 гг. мониторинга (б): 1 – ГС-1; 2 – ГС-2; 3 – ГС-9; 4 – ГС-12; 5 – ГС-6; 6 – ГС-7

Скважина ГС-7 была пробурена и обустроена в октябре 2024 г. Воды напорные, слабосолоноватые с температурой минус 0,3 ^{0}C (февраль 2025 г), что объясняет, тот факт, что вода в скважине не замерзает, а водовмещающие пески, подстилающие мерзлые суглинки и глины, находятся в талом состоянии. Уровень ПВ в скважине ГС-7 постепенно увеличивается с 23,0 м на момент бурения (октябрь 2024 г) до 21,4 м (февраль 2025 г), что подтверждает питание горизонта за счет вертикального и горизонтального подтока вод из нижележащих водоносных горизонтов (Попов, 1965). Это же подтверждает химический состав ПВ: содержание анионов SO_4^{2-} и Cl^- в 6 раз выше, чем в остальных скважинах, а катионов Ca^{2+}, Mg^{2+} и Na^+ выше в 3 и более раз.

Химический состав межмерзлотных ПВ в скважине ГС-6, вскрытых на глубинах 23,0-24,0 м, напротив показывает наименьшее значение анионов SO_4^{2-}, NO_3^- и катионов Ca^{2+}, K^+, Na^+ по отношению к остальным скважинам, а также наименьшее значение минерализации. Хоть скважины ГС-6 и ГС-7, расположенные в черте городской застройки левого берега реки Преображенка на расстоянии 940 м друг от друга, вскрывают МПВ на одинаковых глубинах, однако химический анализ показывает, что питание комплексов происходит из разных источников. Дальнейшие работы по изучению гидрогеологических условий территории г. Салехард позволят определить источники питания водоносных горизонтов, определить взаимосвязь подземных и поверхностных вод, а также их влияние на устойчивость объектов.

Работа выполнена ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» в рамках реализации проекта «Методика автоматизированного гидрогеологического мониторинга для расчета и прогноза состояния грунтов основания объектов», а также госзадания (тема № FWRZ-2021-0007 ИКЗ ТюмНЦ СО РАН).

1. Хрусталев Л.Н. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата // Университетская книга. 2011. С. 259.
2. Попов А.И. Подземный лед // Подземный лед. Выпуск I. М.: Изд-во МГУ. 1965. С. 7-39.
3. Грязнов О.Н., Абатурова И.В. и др. Отчет по комплексной гидрогеологической, инженерно- геологической и геоэкологической съемке масштаба 1:50 000 листа Q- 42-50-А (Салехард) / О. Н. Грязнов [и др.]. Екатеринбург, 2004.

КОНТРОЛЬ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Великин С.А., Вавилов С.А., Давыдов Д.М., Иванов Ю.Г., Минова Е.Н., Черныш Е.М.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск
frozen@vnims.ru

Обострение проблем связанных с деградацией мерзлых пород в связи с усиливающимся влиянием глобального изменения климата, ведущего к потере устойчивости оснований сооружений, требует их детального изучения и контроля.

Проблема взаимодействия составляющих природно-технических систем, возведенных более 50 лет назад в криолитозоне, сегодня в 21 веке не только остается основной, и более того, значительно усугубилась в связи «амортизационной изношенностью» инженерно-геологического окружения крупных инженерно-технических объектов.

Отсутствие должного внимания к этим проблемам уже привели к целой череде аварий, связанных с неучтенными негативными инженерно-геокриологическими процессами, например, Бурейский оползень, авария на Саяно-Шушенской ГЭС, авария на руднике Мир, прорыв дамб дражных котлованов месторождения «Ирелякская россыпь», авария на нефтебазе г. Норильск и др.

Особо уязвимыми участками антропогенных воздействий на криолитозону являются участки расположения гидроэнергетических и гидротехнических сооружений, поскольку их возведение приводит к значительным изменениям инженерно-геокриологических условий, определяющих устойчивость оснований этих сооружений и степень сохранности природного комплекса.

В области их взаимодействия с вмещающими мерзлыми породами часто возникают различные типы инженерно-геологических, гидрогеологических и геокриологических процессов и явлений, которые отрицательно сказываются на жизнедеятельности и эксплуатационных характеристиках сооружений.

Несомненно, что предупреждение их развития связано с диагностикой состояния геокриологической среды. Решение этой задачи невозможно без надежной технологии контроля за геофизическими полями в пределах границ геокриологической среды, вмещающей сооружения. Это определяет необходимость применения геофизических методов в комплексе мониторинга состояния мерзлых пород оснований сооружений.

Спецификой геофизических работ для мониторинга гидротехнических сооружений в криолитозоне является использование обширного объема получаемой информации для оценки текущего состояния инженерно-геокриологического окружения этих объектов.

Основные требования, предъявляемые к эффективному мониторингу процессов деградации мерзлоты - непрерывность и комплексность для обеспечения необходимой полноты данных и своевременного оповещения о появлении негативных инженерно- геокриологических процессов в окружении ГТС.

Институт Мерзлотоведения имеет значительный опыт работ как по изучению геокриологического состояния оснований гидротехнических сооружений на стадии их строительства и эксплуатации, так и по созданию технологий и средств геофизического мониторинга вмещающих их мерзлых пород и грунтовых сооружений.

Развиваемая Институтом мерзлотоведения технология геофизического мониторинга позволяет охватывать как грунтовые сооружения (дамбы и плотины) так и примыкающие к ним массивы пород в береговых частях водоемов. Кроме того, геофизический подход позволяет на ранних стадиях выявлять и отслеживать негативные процессы внутри среды (как геокриологической, так и сформированной при строительстве).

Важным достоинством геофизического подхода является возможность оценки динамики и прогнозирования развития неблагоприятной ситуации. Такой прогноз может послужить обоснованием проведения заблаговременных противоаварийных мероприятий, которые позволят с одной стороны взять под контроль ситуацию, а с другой избежать огромных расходов на ликвидацию случившейся аварии.

В предлагаемом докладе рассмотрены результаты мониторинговых исследований на Вилюйской ГЭС-1\2, флагмане гидроэнергетического строительства в условиях криолитозоны.

Предлагается во многом новый подход к мониторингу мерзлотной обстановки на основе применения масштабируемых логгерных систем с удаленным управлением режимами наблюдений, рассчитанный на возможность коллективного пользования и удаленного управления режимами наблюдений совместно с комплексом скважинных и наземных геофизических исследований.

Предлагаемые методики и технические решения могут иметь широкое поле применения при строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений в континентальной криолитозоне РФ и Арктических территориях РФ, а также применимы для мониторинга оснований крупных сооружений, в т.ч. шахт, карьеров и их породного окружения.

О МЕРЗЛОТНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ НАЛЕДНОЙ ПОЛЯНЫ В ДОЛИНЕ РУЧ. БУРУХИНСКИЙ НА АВТОДОРОГЕ А-360 «ЛЕНА»

Гагарин Л.А.[1], Оленченко В.В.[2], Баишев Н.Е.[1], Николаева Е.С.[1], Огонеров В.В.[1]
[1] ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск
[2] ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск
gagarinleo@yandex.ru

С 2024 г. вдоль федеральной автодороги А-360 «Лена» Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН совместно с Институтом нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН проводятся исследование взаимодействия наледей с линейными инженерными сооружениями. Исследования наледей вдоль указанной автодороги начались почти 100 лет назад В.Г. Петровым (Петров, 1930), затем были продолжены В.Р. Алексеевым (Алексеев, 1972). Несмотря на использование современных материалов и способов строительства проблема негативного влияния наледей на устойчивость автодороги остается весьма актуальной. Целью исследования является детализация мерзлотно-гидрогеологического строения наледной поляны в долине руч. Бурухинский на автодороге А-360 «Лена» в отрогах Станового нагорья. Основные задачи сводятся к выделению мёрзлых, талых и обводнённых пород в разрезе, установлению уровенного режима наледеобразующих подземных вод, местоположения участков их разгрузки, а также выявление мест внутри и подналедного стока.

С помощью геофизических методов установлена геометрия подруслового талика и места субаквальной разгрузки грунтовых вод, питающих наледь в долине руч. Бурухинский в месте пересечения ее федеральной автодорогой А-360 «Лена». По данным элеткрических зондирований таликовые зоны в долине ручья имеют сложную конфигурацию (рис. 1), не выдержаны, как в плане, так и в разрезе.

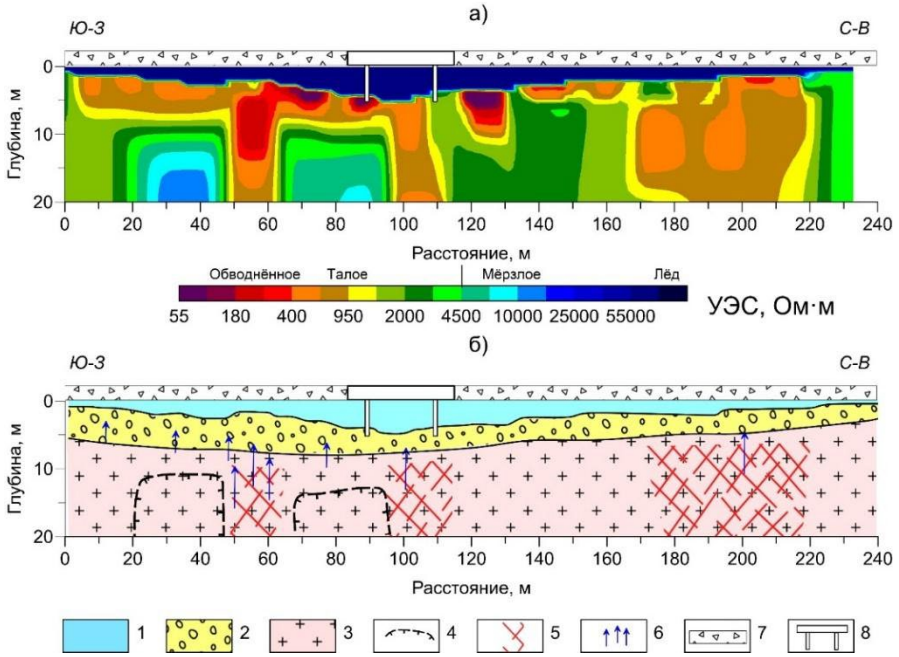


Рис. 1 Геоэлектрический разрез по профилю по данным БИЭП (а) и его интерпретация (б): 1- лёд; 2 – рыхлые отложения; 3 – гранитогнейсы; 4 – граница ММП; 5 – зоны дробления; 6 – каналы фильтрации подземных вод; 7 – дорожное полотно; 8 - мост.

Низкие значения (менее 500 Ом·м) удельного электрического сопротивления косвенно указывают на водообильность аллювиальных отложений и зон трещиноватости в коренных породах, представленных гранитоидами. На основании этого выявлены места подпитывания грунтово-фильтрационного подруслового талика трещинно-жильными водами. С помощью георадиолокации было установлено, что в теле насыпи существует талый козырек горных пород, сохраняющийся в течение зимы под действием тепла фильтрующихся грунтовых вод. Над этой зоной участок автотрассы имеет деформацию в виде просадки. По результатам измерения температуры горных пород в деятельном слое и уровня грунтовых вод в пойме ручья Бурухинский, в полосе автодороги,

установлено, что интенсивный рост наледи начинается лишь в декабре. В течение зимы 2023-2024 гг. отмечено трехкратное увеличение напора грунтовых вод (рис. 2), величина которого достигала положительных значений относительно поверхности земли (до +1,3 м). Динамика уровенного режима грунтовых вод имеет низкую корреляцию с температурой воздуха, глубиной сезонного промерзания горных пород и динамикой высоты снежного покрова. В связи с этим сделано предположение, что режим подземных вод грунтово-фильтрационного талика определяется внутренними факторами: режимом трещинно-жильных вод коренных пород, а также режимом процесса наледеобразования.

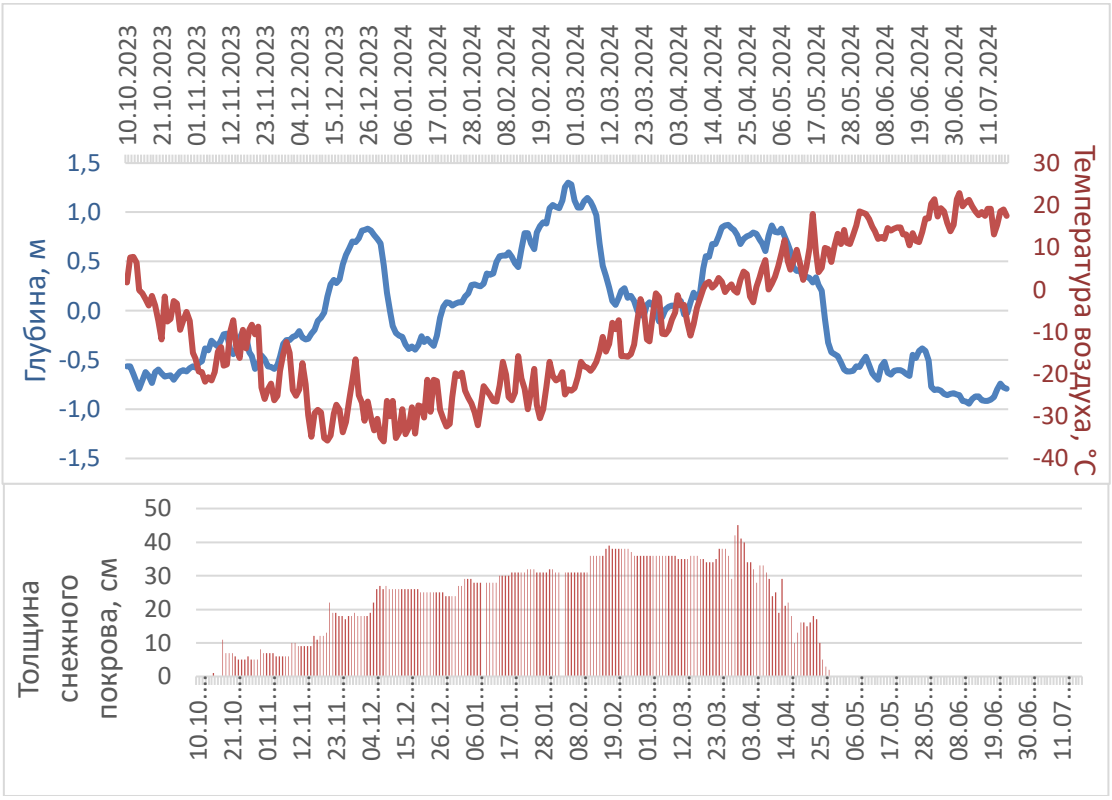


Рис. 2. Графики сопоставления уровней подземных вод в скважине №1-23, температуры воздуха (верхний) и толщины снежного покрова (нижний) по данным метеостанции в г. Тында

1. Петров В.Г. Наледи на Амурско-Якутской магистрали, с альбомом планов наледей. Ленинград: АН СССР; 1930. – 177 с.
2. Алексеев В.Р. Наледи района трассы Амур-Якутской магистрали // Зап. Забайк. фил. Геогр. об-ва СССР. – Чита, 1972 – Вып. 85. – С. 62-81.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ДОЛИНАХ РЕК БАССЕЙНА Р. ТЫРЫ

Гайдукевич В.А.[1], Полубелова А.В.[1,2], Павлова Н.А.[1]
[1] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
GaidukevichVA@mpi.ysn.ru
[2] ФГАОУ ВО Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск
anna.interpol@yandex.ru

В докладе рассмотрены гидрогеологические условия долин рек Тыры и Дыбы, которые берут свое начало в отрогах хребта Сунтар-Хаята и являются малоизученными. Для характеристики этих рек, выявления особенностей режима подземных вод пойменных таликов и химического состава поверхностных и подземных вод использованы фондовые данные АО «Якутскгеология» и Института мерзлотоведения СО РАН, полученные с участием авторского коллектива при геологоразведочных работах с 2013 по 2024 г.

Сунтар-Хаята – один из самых высокогорных хребтов южного Верхоянья с абсолютными отметками 1600-2900 м и относительными превышениями над днищами долин до 600 м. Хребет является водоразделом между р. Алдан (правый приток р. Лены) и р. Индигиркой. Характерной особенностью климата в регионе является резкая континентальность, которая проявляется в больших месячных и годовых амплитудах температуры воздуха. Средняя годовая температура воздуха -10°С. Количество атмосферных осадков изменяется от 150 до 713 мм.

Рассматриваемая территория находится в пределах Южно-Верхоянского гидрогеологического массива со сплошным распространением многолетнемерзлых пород. Мощность их изменяется от 250–350 м на водоразделах и склонах северной экспозиции до 130–210 м на склонах южной экспозиции [Карта…, 1984; Мерзлотно…,1984]. В геологическом строении территория принимают участие интенсивно дислоцированные отложения верхоянского терригенного комплекса, которые прорваны разновозрастными дайками и гранитоидными массивами, сопровождающимися ореолами контактовых роговиков.

Режим рек Тыры и Дыбы и гидравлически связанных с ними подземных вод непостоянен и определяется климатическим факторами и наличием многолетнемерзлых пород. Общими чертами долин рек Тыры и Дыбы является их троговая форма, обусловленная ледниковой деятельностью. Долины этих рек плоские и широкие (до 1–2 км по днищу). Поверхность поймы и надпойменной террасы осложнена многочисленным рытвинами и промоинами глубиной до 1-2 м. Русла рек извилистые, слабоизогнутые, сильно деформирующиеся в паводки. Коренные борта долин рек крутые, сложенные скальными породами, возвышаются над днищем на 900-1200 м. Русловые отложения рек представлены валунами, галькой, песком. Основным источником питания водотоков являются талые воды в весенний период и дождевые воды в летнее время.

Протяженность р. Тыры 327 км, площадь водосбора равна 2090 км^2, река имеет круглогодичный сток. Средний многолетний расход 18 м^3/с, максимальный достигает 123 м^3/с. Уклон долины реки составляет 0,007. Полного перемерзания ее русла зимой не происходит, на реке в это время сохраняются полыньи и формируются многочисленные наледи. За счет их таяния формируется около 25 % речного стока в период половодья и начале лета. Начало половодья на реке в разные годы отмечается с середины до конца мая.

В 221 км от устья р. Тыры, впадет один из крупных правых ее притоков – р. Дыбы, протяженностью 79 км, площадь водосбора равна 1280 км^2. Русло р. Дыбы имеет большой уклон (0,013). Поверхностный сток в р. Дыбы начинается в мае, после насыщения осушенных в зимний период подрусловых аллювиальных отложений и продолжается до сентября. Средний расход реки летом составляет 1–2 м^3/с.

В днищах долин рек Тыры и Дыбы распространены пойменные водоносные талики. Они приурочены к современным четвертичным аллювиальным и аллювиально-пролювиальным отложениям, представленными валунно-гравийно-галечниковыми отложениями, местами с песчаным или суглинистым заполнителем с линзами песка, супесей. Подстилающие их песчано-глинистые сланцы пермского возраста сильно уступают по фильтрационным свойствам четвертичным отложениям.

Подземные воды пойменных таликов под реками Тыры и Дыбы испытывают разную амплитуду колебания уровня в течение года. Так, под р. Тыры, которая имеет круглогодичный сток, диапазон годовых колебаний уровня подземных вод составляет около 4 м. Под р. Дыбы, в которой имеется только сезонный сток, а уклон долины на порядок больше, чем у р. Тыры, в зимний период верхняя часть подруслового талика осушается на 20–30 м. В весенний период при интенсивном снеготаянии сработанные зимой запасы воды в таликах полностью восполняются. В течение лета

уровни подземных и речных вод имеют близкие абсолютные отметки и испытывают синхронные колебания в зависимости от количества выпадающих атмосферных осадков.

Вода р. Тыры обладает невысокой минерализацией (105-370 мг/л), гидрокарбонатно-сульфатным магниево-кальциевым составом, нейтральной реакцией среды (pH 6.4-7.7). Подземные воды пойменного талика р. Тыры близки по минерализации с поверхностными водами (от 127 до 206 мг/л), но отличаются более высоким содержанием гидрокарбонат-ионов (50-60 %-экв в подземных водах против 20-50 %-экв в речных).

По минерализации (78-120 мг/л) воды р. Дыбы ультрапресные, с pH=6,5-7,8. В их анионном составе доли сульфатов и гидрокарбонатов примерно равнозначны. Катионный состав магниево-кальциевый. Подземные воды пойменного талика схожи с поверхностными по минерализации (101-301 мг/л) и по соотношению катионов. Особенностью подземных вод является повышенное содержание сульфат-иона (60-90 %-экв) относительно поверхностных вод (40 %-экв).

Таким образом, режим поверхностных вод р. Тыры, р. Дыбы и пойменных таликов под ними различный и во многом зависит от морфологических характеристик речных долин. Река Дыбы с большим уклоном долины имеет поверхностный сток только в теплый период года, а мощность пойменных таликов под ней испытывает существенные сезонные изменения.

Изучаемые поверхностные водотоки и подземные воды имеют очень низкую минерализацию, что обусловлено, вероятно, высокой скоростью их движения и малым временем взаимодействия с горными породами. При этом колебания в содержании компонентов минерализации в подземных водах значительно меньше, чем у поверхностных вод. В долине р. Дыбы поверхностные и подземные воды содержат больше сульфат-ионов. Источником их, предположительно, являются горные породы Дыбинского рудного узла, в пределах которого расположены истоки р. Дыбы и ее притоков. Преобладание гидрокарбонат-ионов в поверхностных и подземных водах в бассейне р. Тыры можно объяснить их питанием за счет таяния наледей.

СТРОЕНИЕ ПОЙМЕННОГО ТАЛИКА Р.ЛЕНЫ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЕГО ВОДЫ В РАЙОНЕ ПОС. КАНГАЛАССЫ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ)

Горохова Н. Б.[1], Павлова Н. А.
Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск
xnb9@mail.ru

В настоящее время водоснабжение населения г. Якутска и его окрестностей осуществляется в основном за счет поверхностных вод р. Лена. Использование в питьевых целях речных вод не может рассматриваться как перспективное, поскольку, во-первых, они подвержены загрязнению, и, во-вторых, их химический состав испытывает внутригодовую изменчивость, что требует применения разных методов водоподготовки по сезонам года. Альтернативным источником питьевого водоснабжения могут рассматриваться воды подруслового талика р. Лены, качество которых, как правило, стабильно и даже при незначительных отклонениях от норм не требует постоянной корректировки водоподготовки.

Целью выполненных исследований было изучить химический состав подземных вод водоносных горизонтов под руслом р. Лены в районе пос. Кангалассы (северная окраина городского округа «г. Якутск»). Фактическим материалом для исследований послужили данные буровых работ, а также гидрохимического опробования воды р. Лены и подземных вод из действующих водозаборных скважин, каптирующих подрусловой водоносный комплекс, за период 2015-2022 гг.

В гидрогеологическом отношении территория исследований находится в пределах Якутского артезианского бассейна, в зоне сплошного развития многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью от 175 до 500 м. Уровни подмерзлотных вод, несмотря на высокие напоры, устанавливаются на отметках близких к 0 и даже ниже уровня мирового океана. Сплошность ММП нарушается на участках пересечения русла р. Лены тектоническим разломами. Так, в районе Кангалласского мыса под рекой наличие сквозного талика подтверждено бурением и геофизическими работами (Шепелев, Макогонова, 2010). На надпойменных террасах распространены ММП, их мощность составляет 250 м, а глубина слоя сезонного протаивания пород не превышает 3 м.

Под руслом р. Лены и ее протоками талые водоносные породы вскрыты скважинами глубиной 60-80 м. Водовмещающими являются четвертичные аллювиальные песчано-галечные образования мощностью до 13 м и подстилающие их пески и песчаники нижнего мела с прослоями глин, алевролита и углей. В пойме реки, где аллювиальные отложения проморожены, подземные воды мелового водоносного комплекса приобретают местный криогенный напор. Их уровень в скважинах устанавливается на глубинах 8,1-13,3 м от поверхности земли (абс. отм. (75-83 м)).

Питание водоносного комплекса осуществляется в основном за счет речных вод. Незначительная доля питания приходится на инфильтрацию атмосферных осадков, особенно на участках поймы, где в кровле водоносного горизонта мерзлые породы отсутствуют. Однако, поскольку объем атмосферных осадков в летнее время несоизмерим с объемом речных вод, а площадь их инфильтрации весьма ограничена, то существенной роли в формировании запасов подземных вод подруслового талика р. Лены они не играют.

Согласно данным гидрохимического опробования, минерализация воды р. Лена в начале лета составляет 120 мг/дм^3, ее химический состав хлоридно-гидрокарбонатный магниево-кальциевый, рн 7,2-7,8. Зимой минерализация воды возрастает до 330-420 мг/дм^3, ее химический состав преобразуется в гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-натриевый. В речной воде превышают нормы, установленные для питьевых вод, цветность и мутность, а также содержание железа – 0,5-1,0 мг/дм^3 при ПДК 0,3 мг/дм^3.

В подрусловых водах мелового водоносного комплекса в анионном составе преобладают гидрокарбонат-ионы (70-82%), хлорид-ионы (17-29%), в катионном составе на долю натрия приходится 54-67%, кальция – 20-29%. По величине минерализации (0,5-0,6 г/дм3), воды классифицируются как пресные, по значению водородного показателя (pH=7,5-7,7) – нейтральные (Табл.). По органолептическим показателям они не соответствует требованиям, предъявляемым к питьевым водам по показателю мутности 1,8-6,7 (ПДК 1,5 мг/л), содержанию железа (от 0,43 до 1,35 мг/дм3), лития (0,08-0,07 мг/дм3 при ПДК 0,03 мг/дм3). Источником железа в подрусловых водах, вероятно, являются водовмещающие песчаники. Повышенное содержание лития может объясняться поступлением его из глинистых слоев, которые встречены при бурении скважин в приконтактной зоне четвертных и меловых отложений. Учитывая большую разницу абсолютных отметок уровня подземных вод мелового водоносного комплекса и подмерзлотных вод на прилегающей территории, можно предполагать, что в районе Кангалласского мыса через подрусловой сквозной талик происходит питание подземных вод.

Таблица. 1. Химический состав подземных воднижнемелового водоносного комплекса под р. Леной

Показатель	Единица измерения	Норма для питьевых вод	2015	2017	2019	2022
Окисляемость	мгO_2/дм³	5,0	н.о.	н.о.	2,44	3,7
Мутность	ЕФМ	1,5	н.о.	н.о.	1,8	6,7
Цветность	градус	20	н.о.	н.о.	7,4	15,1
Жесткость	мг-экв/дм³	7	н.о.	н.о.	2,8	2
Минерализация	г/дм³	1,0	н.о.	0,5	0,49	0,48
HCO3	мг/дм³	н.н.	н.о.	203,3	208,9	239,3
SO4	мг/дм³	500	3,1	3,1	1,0	1,5
Cl	мг/дм³	350	43,2	49,2	27,6	49,8
Na	мг/дм³	200	93,8	78,3	95,5	99
Mg	мг/дм³	50	14,4	13,2	12,8	15,6
Ca	мг/дм³	н.н.	42,0	36,3	28,7	15,3
Fe	мг/дм³	0,3	0,6	0,9	0,7	0,5
Mn	мг/дм³	0,1	0,03	0,01	0,03	0,02
NO_3	мг/дм³	45	0,5	0,2	0,2	н.о.
н.о. - показатель не определялся, н.н.- не нормируется						

Шепелев Н.Г., Макогонова О.В. Моделирование гидрогеологических условий подмерзлотного водоносного комплекса для территории г. Якутска // Наука и образование, 2010, № 2 (58). С. 21–26.

ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА ВОДЫ РЕК В ЗОНЕ МЕРЗЛОТЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Долгополова Е.Н.
Институт водных проблем РАН, Москва
dolgopolova@gmail.com

Российские реки водосбора Северного Ледовитого океана текут в зоне многолетнемерзлых пород (ММП) и находятся подо льдом около полугода. Лед, находящийся в составе грунта, покрывающий речные потоки и устьевое взморье, наиболее чувствительный элемент к изменениям среднегодовой температуры воздуха *T*. Устья рек являются индикаторами процессов, происходящих на суше и в океане в условиях повышающейся *T*. Устойчивый тренд повышения температуры воздуха и активное освоение территорий устьев и Арктического шельфа способствуют развитию процессов, свойственных только субарктической области, большая часть которой находится в зоне многолетнемерзлых пород (ММП).

В арктическом и субарктическом поясах Северной Америки и России в 2017 г. наблюдалось максимальное повышение *T* ~2–3℃ по сравнению с осредненной за 1880–1920 гг. Например, на территории дельт Печоры и Колымы тренд *T* за 1976–2018 гг. составил 1.2–1.4 °C/10 лет. Вследствие роста *T* увеличивается глубина сезонного оттаивания грунта, приводящая к изменению ландшафта дельты и увеличению поверхностного стока в реки. Толщина ледяного припая у берегов Арктики становится меньше, и площадь его распространения уменьшалась в 1976–2007 гг. со скоростью 12300 км^2 год$^{-1}$ (0.7% год$^{-1}$). Изменение движения морских льдов на Арктических устьевых взморьях, рост уровня моря на протяжении XX века и увеличение просадки грунта в дельтах приводят к затоплениям прибрежных территорий и вызывают деградацию мерзлоты на территории арктических дельт. Наводнения, возникающие в периоды замерзания и вскрытия реки, в результате дождевых паводков и при штормовых нагонах оказывают отепляющее действие на дельтовые равнины с малым уклоном и приводят к дополнительному оттаиванию грунта.

В работе рассматриваются тренды роста *T* в дельтах и среднем течении рек Печора, Лена, Яна, Индигирка и Колыма. В качестве индикатора реакции рек на рост среднегодовой *T* исследуется скорость роста расхода воды в вершинах дельт или на гидрометеорологических постах ближайших к ним. Оценка скорости роста расхода воды по наиболее длинным рядам наблюдений показала, что чем южнее расположена вершина дельты (или ближайший к ней г/п), тем меньше скорость увеличения речного расхода. Также исследовались изменения величин осадков, длительности подледного периода рек и толщины льда.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0001 *Государственного задания ИВП РАН.*

ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУБАЭРАЛЬНЫХ ТАЛИКОВ В ДЮННЫХ МАССИВАХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ Р.ВИЛЮЙ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ)

Едемский Д.Е. [1], **Лыткин В.М.** [2], **Прокопович И.В.** [3]

[1, 3] *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк.*

[2] *Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск;*

[1] deedemsky@gmail.com; [2] gidro1967@mail.ru; [3] prokop@izmiran.ru

В условиях глобального изменения климата Арктика и субарктические регионы подвергаются наиболее интенсивным трансформациям. Одним из ключевых процессов, сопровождающих эти изменения, является деградация вечной мерзлоты, которая оказывает значительное влияние на экосистемы, гидрологический режим и инфраструктуру. Одним из процессов, которые могут сопутствовать деградации многолетнемерзлых пород является возникновение и увеличение площадей субаэральных таликов. Изучение субаэральных таликов становится особенно актуальным в связи с тем, что их количество может повыситься при ускорении деградации МПП, что может привести к серьезным экологическим и социально-экономическим последствиям в следствии увеличения термоэрозионных и термосуффозионных процессов, которые возникают в местах их разгрузки. В работе представлены результаты георадиолокационного исследования на участках выхода грунтовых вод, приуроченных к тукуланам Махатта и Кысыл-Сыр.

Исследования проведены с использованием георадара «Лоза-В» (антенны 50 и 150 МГц). Выполненные георадарные профили привязывались с помощью GPS приемника. Обработка радарограмм включала в себя: подбор оптимального усиления сигнала, регулировка яркости и контрастности, применение полосовой фильтрации и функции усреднения.

Цель работы — изучение субаэральных таликов в дюнных массивах Махатта и Кысыл-Сыр (р. Вилюй) методами георадиолокации для оценки их границ и диагностических признаков.

Во время проведения полевых работ заложены три георадарных профиля на тукулане Кысыл-Сыр и два на тукулане Махатта. В результате выполненных исследований выявлены зоны разгрузки подземных вод, границы надмерзлотных субэаральных таликов и установлена граница геологических горизонтов.

1. В активной части тукулана Махатта границы субаэральных надмерзлотных таликов располагаются на глубинах 4,5–10 м. В долине ручья Кысыл-Юрях на глубине ~10 м и 7.5 м. выявлены палеорусла, которые интерпретируются как понижения погребенных тальвегов, заполненных песчано-гравийно-галечным аллювием.
2. В дюнном массиве Кысыл-Сыр выделен надмерзлотный талик шириной 550 м с глубиной залегания от 13 до 32 м, который формирует каналы миграции подземных вод и разгружается в основании обрыва дюнного массива. На радограмме выявлены четыре зоны с разной текстурой отражений, включая влагонасыщенные горизонты и участки разгрузки вод.
3. Анализ амплитуд сигнала позволяет идентифицировать влагонасыщенные горизонты (отрицательная полярность сигнала) и зоны «реверберации», которые коррелируются с местами разгрузки подземных вод в основании обнажения.

Метод георадиолокации оказался эффективным при обнаружении и выделении границ субэральных таликов в песчаных отложениях в области распространения сплошной ММП. Сопоставление результатов георадиолокации с ранее полученными данными геоэлектрического разреза, показало, что отражающие границы, связанные с различием сред по диэлектрической проницаемости, хорошо коррелируются с границами на геоэлектрическом разрезе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 25-27-00208, https://rscf.ru/project/25-27-00208/).

1. Галанин А.А., Павлова М.Р., Шапошников Г.И., Лыткин В.М. Тукуланы: песчаные пустыни Якутии // Природа. – 2016. – № 11. – С. 44–55.
2. Паламарчук В.А., Лебедева Л.С., Павлова Н.А., Современное состояние источников подземных вод песчаного массива Махатта, Восточная Сибирь // Криосфера Земли. – 2023. – Т. 27, № 4. – С. 24-36.

ВЛИЯНИЕ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ НА ГЕОХИМИЮ ПОРОВЫХ ВОД ОЛИГОТРОФНЫХ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Истигечев Г.И., Лойко С.В., Крицков И.В., Лим А.Г.
Томский государственный университет, Томск
istigechev.g@yandex.ru

Большая часть данных, полученных исследователями северного полушария, характеризует процессы, происходящие летом. Но зимний период с точки зрения геохимии не является инертным. При отрицательных температурах активно происходит капиллярный перенос веществ. Промерзание природных вод значительно меняет формы нахождения и подвижность как истинно растворенных, так и коллоидных соединений углерода и металлов. В почвах же растворы подтягиваются и концентрируются на границе промерзания. Особенно это актуально для Западно-Сибирской равнины – одной из крупнейших и наиболее заболоченных равнин в мире. В её северной части распространена многолетняя мерзлота, что создаёт особые условия для изучения процессов криотрансформации. На сегодняшний день не определено влияние сезонного промерзания на формирование состава болотных вод, а также на геохимические характеристики стока элементов с заболоченных водосборов. Вместе с тем потепление климата, увеличение частоты перехода температур через ноль в сезонных циклах делают актуальным решение обозначенной проблемы.

Для выяснения особенности влияния сезонного промерзания на геохимические параметры поровых вод торфяных олиготрофных почв были проведены зимние полевые исследования, а также эксперимент по промораживанию торфяных колонок с градиентом температур.

Эксперимент с промораживанием торфяных колонок, торф которых предварительно был измельчен, гомогенизирован и увлажнен до одной влажности, показал существенную дифференциацию гидрохимических параметров в пределах торфяных колонок после их промораживания на глубину до 50–60 см. Минимальные температуры были несколько ниже минус пяти градусов у поверхности. Даже такое несильное промораживание привело к тому, что значения pH менялись на 0,5 единицы, а электропроводности выросли в два раза. Наблюдалось увеличение влажности в приповерхностных горизонтах, в то время как нижняя часть колонок имела тенденцию к уменьшению влажности.

На рисунке показаны некоторые изученные параметры. Такие элементы, как фосфор и марганец, продемонстрировали наибольшие изменения. Факторный анализ данных показал, что наибольшие эффекты проявляются на торфе с наибольшей степенью разложения в сравнении со сфагновым торфом. Определяющую роль играют капиллярные эффекты, возникающие в замерзшем слое. В ультратонких незамерзших порах продолжается движение воды по температурному градиенту к верхней части колонки, что приводит к уменьшению содержания РОУ за счет «отсева» крупных коллоидов, при этом относительно увеличивается концентрация таких катионов, как кальций, магний, натрий, барий, а также восстановленный марганец. Растёт и влажность в этом направлении. Соединения, связанные с коллоидным перемещением, относительно накапливаются в нижней части колонки.

Проведенный эксперимент наглядно демонстрирует капиллярные эффекты в переносе веществ внутри мерзлого горизонта. Стоит отметить, что схожие процессы отвечают и за накопление низкомолекулярных органических кислот, сахаров в верхней части торфяной мерзлоты. Осенью и зимой, когда замерзает сезонно-талый слой, происходит капиллярное подтягивание этих соединений в область, где остаточно-эутрофный торф переходит в сфагновый, что сказывается на увеличении эффективного диаметра пор, с одной стороны, а с другой – в область, где температура почвы опускается ниже минус 7 градусов.

Исследования проводятся при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-17-00281.

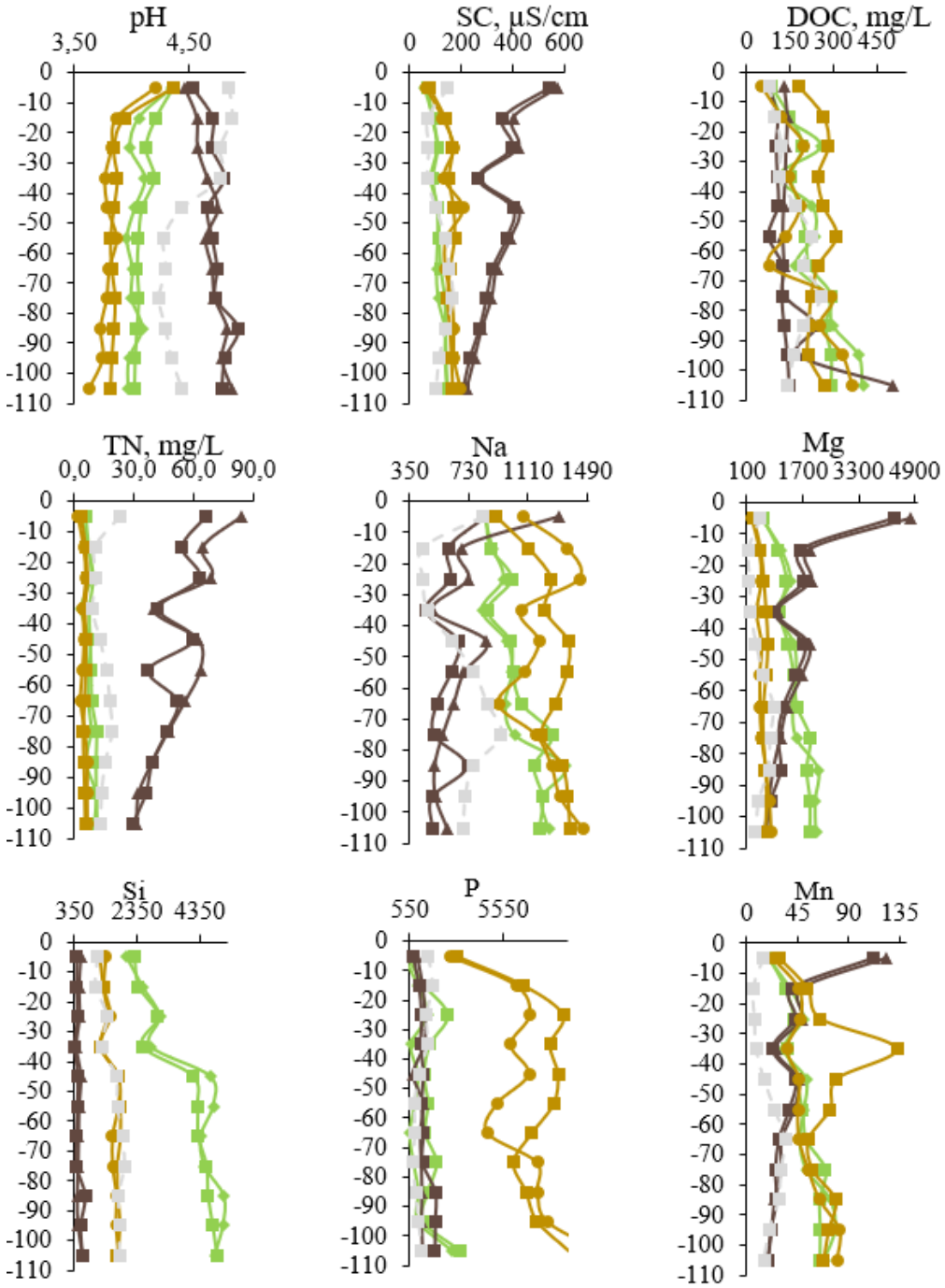


Рисунок. 1. Распределение гидрохимических параметров в экспериментальных колонках, заполненных исходно однородным торфом и экспонированных в зимних условиях в естественной среде, будучи погруженными на глубине 110 см.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ РЕК КРИОЛИТОЗОНЫ

Кондратьев А.Н.[1], Поваляев Н.Р.[2], Гордеева Н.И.[3], Стрюцкая А.О.[4]
[1] ООО «Русловые процессы», Санкт-Петербург;
[2] Краснодар;
[3] АО «Нефтехимпроект», Казань; [4]ООО «ДАТУМ Инжиниринг», Ростов-на-Дону
info@rusloved.ru

В работе проведён анализ действующих нормативных документов по русловым процессам (ВСН 163-83, СТО ГУ ГГИ 08.29-2009 и др.), нормативного документа СП 493.1325800.2020. «Инженерные изыскания для строительства в районах распространения многолетнемёрзлых грунтов» и приведённых в них типизаций русловых процессов. Выявлены недостатки в этих нормативах в части описания рек криолитозны. Предлагается использовать многокритериальную классификацию русловых процессов с несколькими руслоформирующими факторами. Для криолитозоны необходимо расширить эту классификацию, детализировав её, исходя из разного типа взаимодействия между водным потоком, наносами и мёрзлыми грунтами для рек разного размера: малых, средних и больших.

Типизация русловых процессов Государственного гидрологического института (ГГИ), которая взята за основу большинства нормативных документов, включает семь типов русловых процессов: ленточногрядовый, побочневый и осерёдковый типы, пойменная многорукавность, ограниченное, свободное и незавершённое меандрирование. В новом специализированном нормативном документе СП 493.1325800.2020 в таблице Л2 эта типизация дополнена типами русловых процессов горных рек: долинным блужданием и горной пойменной многорукавностью. Использованный в этом СП дополнительный критерий «тип русла» в таблице Л1 представляет собой относительную ширину дна долины как ограничивающий фактор для планового развития речного русла.

В однокритериальной типизации ГГИ и в двухкритериальной классификации СП 493.1325800.2020 не учтены руслоформирующие факторы и особенности руслоформирования, специфические для рек криолитозоны. Поэтому актуально расширение классификации русловых процессов с учётом особенностей рек криолитозоны.

Предложенная нами ранее многокритериальная классификация русловых процессов рек, где использовано несколько руслоформирующих факторов (Кондратьев А.Н. и др., 2025), даёт более полное описание русловых процессов, чем упомянутые выше классификации. Данная классификация учитывает следующие критерии: 1) ограничивающие условия для горизонтальных деформаций речного русла, 2) условия, определяющие вертикальные деформации, 3) условия, приводящие к образованию пойменных разветвлений разной степени, 4) схемы деформаций каждого рукава.

Для криолитозоны предлагается расширить эту классификацию, учитывая наличие мерзлоты и её взаимодействие с водотоками разного размера. Для малых рек мерзлота является ограничивающим условием; для средних рек такое ограничение отсутствует из-за отепляющего воздействия речного потока; для больших рек поток интенсифицирует размыв оттаявшего льдистого грунта берегов. Воздействие мерзлоты можно учитывать как отдельный пятый критерий, либо как дополнительный корректирующий фактор на каждый из критериев, выделенных в предыдущем абзаце.

Для малых рек влияние мерзлоты проявляется по каждому перечисленному выше критерию: 1) мёрзлые грунты берега являются ограничивающим фактором для горизонтальных деформаций речного русла, скорость береговых размывов уменьшается; 2) мёрзлые грунты дна являются ограничивающим фактором для вертикальных деформаций речного русла, уменьшая интенсивность донных размывов; 3) мёрзлые грунты поймы являются сдерживающим фактором для развития пойменных проток, возможность разработки поток уменьшается; 4) схема деформаций речного русла по последовательности «меандрирование – прямые русла – осерёдковый тип – русловая многорукавность», связанная с соотношением транспортирующей способности потока и поступлением наносов в русло (Кондратьев А.Н., 1999) изменяется по двум вариантам: для малых рек мерзлота сдерживает поступление наносов в русло, соответственно, тип русловых процессов смещается в сторону меандрирования; в то же время, меандрированию препятствует сдерживающее воздействие грунтов берега по схеме в п. 1 этого абзаца; таким образом, проявляется дополнительный критерий в виде активного воздействия одного фактора и пассивного противодействия другого, и результирующая схема деформаций зависит от степени их взаимодействия, поэтому в зоне вечной мерзлоты типичны малые извилистые реки с нерегулярными изгибами.

Для средних рек воздействие мерзлоты нивелируется балансом между ограничивающим воздействием промерзших грунтов и отепляющим воздействием водного потока. Поэтому для таких рек достаточно применения приведённой выше четырёхфакторной классификации (либо других, более детальных классификаций).

Для больших рек влияние мерзлоты проявляется обратным образом, чем для малых рек: 1) оттаявшие грунты берега не препятствуют горизонтальным деформациям речного русла и могут их интенсифицировать; 2) оттаявшие грунты дна не препятствуют глубинным деформациям; 3) оттаявшие грунты поймы интенсифицируют развитие пойменных проток, возможность разработки проток увеличивается; 4) для больших рек оттаявшие берега увеличивают поступление наносов в русло, соответственно, тип русловых процессов смещается в сторону осерёдкового типа и русловой многорукавности с руслами, перегруженными наносами, поэтому в зоне вечной мерзлоты типичны большие разбросанные, распластанные многорукавные реки, развивающиеся по схеме русловой многорукавности.

Таким образом, ранее разработанную нами многокритериальную классификацию русловых процессов (выраженную в нескольких двухкритериальных классификациях при попарном сочетании разных критериев) (Кондратьев А.Н. и др., 2025) предлагается расширить с учётом дополнительного критерия – воздействие мерзлоты.

Такое многокритериальное представление типов русловых процессов заметно улучшает как однокритериальную классификацию ГГИ (ВСН 163-83 и др.), так и двухкритериальную классификацию СП 493.1325800.2020. Кроме того, данная многокритериальная классификация учитывает влияние мерзлоты на русловые процессы рек, что является преимуществом при практической оценке русловых деформаций, т.к. этот фактор не рассматривается в вышеуказанных и в других нормативах по русловым процессам.

Предлагаемая нами классификация предусматривает расширение путём введения других критериев, соответствующих разным дополнительным руслоформирующим факторам.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДЫ р. МАЛАЯ БОТУОБИЯ В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА

Ксенофонтова М.И.
Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера им. проф. Д.Д. Саввинова СВФУ
ksemaria@mail.ru

Материалом для данной работы являются результаты гидрохимических исследований р. Малая Ботуобия, проведенных в период ледостава 2019 г., были исследованы 2 точки наблюдения – выше и ниже устья р. Ирелях, кроме того, отобраны пробы поверхностных вод и льда, образовавшиеся в период ледостава.

По результатам исследования выявлено, что в период исследования поверхностный сток в точке выше устья р. Ирелях характеризуется повышенной минерализацией с нейтральной средой и умеренно-жесткой водой. Состав воды по классификации преимущественно сульфатно-хлоридно-кальциево-магниево-натриевая. По главным ионам превышения нормативов ПДКдля рыбохозяйственных целей (далее ПДКр/х) выявлено по SO_4^{2-} до 2,6 раз, по NO_2^- до 7,5 раз. По цветности наблюдается превышения гигиеническим нормативам до 3,3 раз. Мутность воды ниже 1 ЕМФ. Также в воде присутствуют NO_3^- и F^-, содержание которых не превышают нормативы ПДКр/х. По величине ХПК отмечается превышение нормативов ПДКр/х до 1,6 раз. По микроэлементам выявлены превышения нормативов ПДКр/х по $Fe_{общ}$ до 2,1 раз, по Al до 3,7 раз, по Cu до 8,3 раз, по Mn до 22,6 раз. Кроме того, в воде обнаружен Sr^{2+}, концентрация которого не превышает нормативы ПДКр/х. Из органических веществ в воде выявлены нефтепродукты, АПАВ и фенолы, содержания которых довольно высокие по сравнению с другими точками наблюдения. Таким образом, поверхностный сток на р. Малая Ботуобия на участке выше р. Ирелях имеет высокие концентрации ряда микроэлементов, SO_4^{2-} и NO_2^-.

Вода р. Малая Ботуобия в точке ниже устья р. Ирелях (Т-5) в период ледостава имеет зимний сток. Общая глубина реки на данной точке составляет 2,25 м, мощность льда – 2,11 м. В период исследования вода р. Малая Ботуобия в данной точке наблюдения характеризуется повышенной минерализацией с нейтральной средой и умеренно-жесткой водой. Состав воды по классификации Алекина О.А. (1953) преимущественно сульфатно-хлоридно-кальциево-магниево-натриевый. Отмечаются высокие концентрации SO_4^{2-} до 2,4 ПДКр/х. Также в воде выявлены NO_2^- до 3,8 ПДКр/х, NO_3^- и F^-, содержание которых в пределах нормативов ПДКр/х. По величине ХПК превышения зафиксированы в пределах 1,4 ПДКр/х. По цветности наблюдается превышения гигиенических нормативов до 2,5 раз/ Из микроэлементного состава воды отмечается высокие концентрации по Mn до 11 ПДКр/х, по Cu до 10,8 ПДКр/х, по Al до 5,3 ПДКр/х и по $Fe_{общ}$ до 2,2 ПДКр/х. В исследованной воде наблюдается содержание Sr^{2+}, в пределах нормативов ПДКр/х. Из органических веществ в воде р. Малая Ботуобия присутствуют нефтепродукты, АПАВ и фенолы.

Кроме поверхностных вод, были отобраны пробы из толщи льда, которые имеют различную текстуру и цвет, образовавшихся в период ледостава р. Малая Ботуобия. Визуально выделяются 6 слоев, отобраны объединенные пробы с верхних и нижних слоев.

Верхние слои толщи льда характеризуется средней минерализацией со слабощелочной средой и умеренно-жесткой водой. Состав воды преимущественно сульфатно-кальциево-натриево-магниевая. Превышения нормативов ПДКр/х отмечается по SO_4^{2-} до 2,3 раз, по Mn до 13,4 раз, по Cu до 7 раз, по Al до 3,6 раз, по $Fe_{общ.}$ до 1,1 раз. В исследованной воде толщи льда присутствуют нефтепродукты, АПАВ и фенолы. Кроме того, зафиксированы Sr^{2+}, NO_3^- и F^-, содержания которых не превышают нормативы ПДКр/х.

Нижние слои толщи льда характеризуются малой минерализацией с нейтральной средой и очень мягкой водой. Состав воды преимущественно гидрокарбонатно-сульфатного класса группы кальция. В данном слое льда отмечается высокая цветность до 145 град (превышения гигиенического норматива до 7,3 раз) и мутность до 43 ЕМФ (превышения гигиенического норматива до 16,5 раз). В данной толще льда выявлены очень высокие концентрации NO_2^- (до 33,8 ПДКр/х) и NO_3^- (превышений ПДКр/х не зафиксировано) относительно верхних слоев толщи льда и воды р. Малая Ботуобия (рис 1).

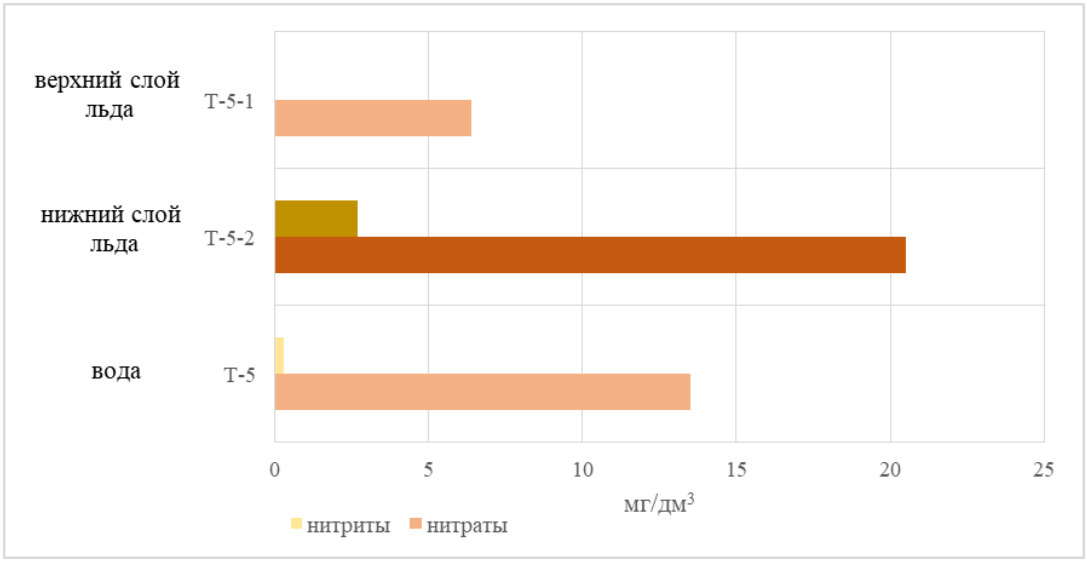
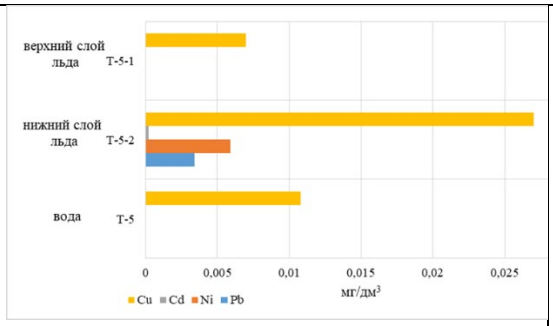
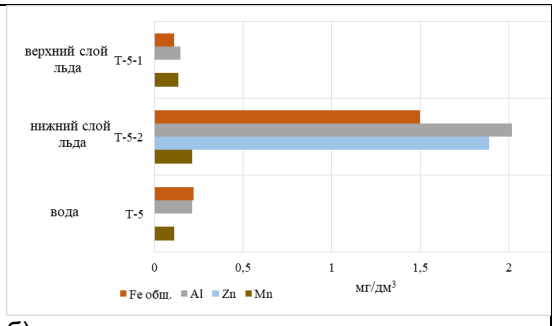


Рис. 1 Динамика изменения нитритов и нитратов в верхних и нижних толщах льда

Из микроэлементного состава воды в исследуемой воде зафиксированы Pb, Ni, Mn (до 21 ПДКр/х), Cd, Zn (до 189 ПДКр/х), Cu (до 27 ПДКр/х), Al (до 50,5 ПДКр/х), $Fe_{общ}$ (до 15 ПДКр/х). В данной толще льда наблюдаются максимальные концентрации микроэлементов (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Динамика изменения некоторых микроэлементов в верхних и нижних толщах льда

Из органических веществ отмечаются довольно высокие концентрации нефтепродуктов до 11,4 ПДКр/х. Кроме того, по сравнению с верхними слоями и водой, наблюдаются максимальные концентрации АПАВ и фенолов.

Таким образом, поверхностная вода р. Малая Ботуобия в период зимнего ледостава имеет повышенную минерализацию, где в ионном составе доминируют сульфаты, кальций, магний и натрий. Присутствие Sr^{2+} и F^- возможно указывает на разгрузку подземных вод, высокие концентрации Al, Cu и Mn на техногенные стоки, а большие содержания NO_2^-, АПАВ и фенолов – на стоки антропогенного характера. Нижний слой толщи льда отличается наибольшим содержанием микроэлементов, нитритов, нитратов, а также высокой цветностью и мутностью. При этом данный слой характеризуется меньшей минерализацией, чем верхний слой льда. Вероятно, высокие содержания некоторых показателей связано с взвешенными веществами, которые в период становления ледостава сконцентрировались в нижние толщи воды р. Малая Ботуобия.

СТАБИЛЬНЫЕ И РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ ВОДЫ В ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ СПЛОШНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Лебедева Л.С., Павлова Н.А.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
lyudmilaslebedeva@gmail.com

В сплошной криолитозоне, где взаимодействие поверхностных и подземных вод затруднено присутствием криогенного водоупора, оценка происхождения воды в подземных горизонтах может позволить сделать выводы о распространении и динамике многолетнемерзлых пород и таликов в условиях изменения климата. Целью работы являлось оценка источников питания и возраста надмерзлотных и межмерзлотных подземных вод, развитых в области сплошной криолитозоны Центральной Якутии, на основе новых данных о содержании трития и стабильных изотопов воды. Тритий, радиоактивный изотоп водорода с массой 3 а. е. м. и периодом полураспада 12,32 года, входит в молекулу сверхтяжелой воды и может играть роль трассера, по содержанию которого оценивается происхождение и время нахождения воды в водном объекте. Искусственное введение огромного количества трития в атмосферу Земли вследствие ядерных взрывов в середине 20 в. позволяет рассчитать для каждой пробы доли воды старше и моложе этих событий. Стабильные изотопы воды использовались для оценки вклада дождевой, снеговой и озерной воды в исследуемый водный объект. За период с 2019 было отобрано более 30 проб подземных вод для анализа содержания трития и более 150 проб для определения стабильных изотопов воды. Выявлено отсутствие "старой" воды в надмерзлотных таликовых водоносных горизонтах, различные ее доли в межмерзлотных горизонтах и полное доминирование «старой» воды в подмерзлотных водах. Показаны три основных источника питания надмерзлотно-межмерзлотных подземных вод в регионе исследования: атмосферные осадки, озерные воды и подмерзлотные подземные воды. Некоторые выходы межмерзлотных вод, такие как Улахан-Тарын и Юнюгестях, питаются смесью всех трех источников, в то время как другие, как Ерюю и Суллар, в основном питаются водами озер и атмосферных осадков. Мелкие родники Мечта, Находка и Кетюрен, а также надмерзлотные воды, в основном пополняются водами атмосферных осадков. Полученные расчетные оценки долей «старой» и «новой» воды и источников питания согласуются друг с другом и с общим представлением о функционировании сложной гидрогеологической системы Центральной Якутии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда (проект № 25-17-20036).

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗОТОПНОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ПРИМЕРЕ Г. САЛЕХАРД

Паламарчук В.А[1], Токарев И.В.[2], Башкова А.А.[3], Чежина Е.П.[2]
[1] *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень*
[2] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*
[3] *ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», Салехард*
palamarchuk97@inbox.ru

Многолетние наблюдения Института криосферы Земли в ЯНАО указывают на повышение среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород (ММП). Например, в лесотундре и северной тайге оттаивание мерзлых толщ сверху достигло глубин 7–10 м (Васильев и др., 2020), что приводит к формированию зоны аэрации на месте бывшего сезонно-талого слоя, углублению и расширению таликов, усилению взаимосвязи между атмосферными, поверхностными и подземными водами и соответствующей трансформации химического состава природных вод (Colombo et al., 2018). Для изучения влияния деградации мерзлоты на геохимический облик природных вод в г. Салехард в 2023–2024 г. были отобраны пробы подземных и поверхностных вод на макрокомпонентный (105 проб), микрокомпонентный (160 проб) и изотопный (71 проба) анализы. Поверхностные воды отбирались из крупных (Обь, Полуй) и небольших (Васьеган, Преображенка, Наледный и др.) рек, подземные – из гидрогеологических скважин глубиной 10–25 м. Химические анализы выполнялись в лабораториях г. Надым, г. Салехард и г. Черноголовка. Измерение изотопного состава воды выполнено в Научном парке СПбГУ. Для интерпретации результатов привлечены фондовые гидрохимические данные за 2002 г (Грязнов и др., 2004).

За 23 года заметны изменения в химическом составе речных вод Васьегана и Преображенки. В 2002 г. основными анионами были HCO_3^- или SO_4^{2-} с преобладанием Mg^{2+}, иногда NH_4^+ (с концентрацией до 25 мг/л) в катионном составе (рис.1.Б) при минерализации 0,03–0,4 г/л. Летом 2023–2024 г. в анионном составе вод превалировал HCO_3^-, а в катионном – Ca^{2+}, максимальное содержание NH_4^+ не превышало 2 мг/л, минерализация колебалась в пределах 0,03–0,3 г/л. В микрокомпонентном составе речных вод выраженно уменьшились содержания B, Al, Cr, Co, Ni, Zn, Br, Ba, Pb и увеличились – Mn, Fe, Cd, W, Mo, Sr, As, V. Подземные воды по данным опробования 2024 г. имели HCO_3–Ca–Mg тип с минерализацией 0,1–1,3 г/л. Практически во всех случаях обнаружены превышения ПДК NH_4^+, нефтепродуктов и фенолов. В подземных водах выявлены повышенные, в сравнении с поверхностными водами, содержания Al, Mn, Fe, Ni, Pb, Li, Be, Rb, Nb, Mo, Cd, Sb, W, Tl, Br. Максимальная минерализация была отмечена в скважине в городе, а минимальная – в скважине на сельскохозяйственном поле, здесь же обнаружены повышенные содержания нитратов (до 36 мг/л), что, вероятно, связано с использованием азотных удобрений. Отмеченные изменения в макрокомпонентном составе поверхностных вод, а также повышенные содержания тяжелых металлов в подземных водах могут быть связаны как с миграцией этих элементов из оттаивающих пород, так и с развивающимся техногенезом.

В целом, речные и подземные воды в г. Салехард имеют схожий изотопный состав (рис. 1 А), при средних величинах $\delta^{18}O$ = -16,7 ‰, $\delta^{2}H$ = -123,0 ‰, dexc = 10,8 ‰ для подземных и $\delta^{18}O$ = -16,8 ‰, $\delta^{2}H$ = -123,6 ‰, dexc = 10,3 ‰ для поверхностных вод, что указывает на общие условия формирования и тесную гидравлическую связь. Наиболее легкий изотопный состав речных вод наблюдался в первых числах июня и был связан со снеготалым половодьем, а тяжелый состав речных вод характерен для августа и сентября. Воды озер имеют средний состав $\delta^{18}O$ = -10,9‰, $\delta^{2}H$ = -96,2 ‰, dexc = -8,2 ‰, что указывает на влияние испарения. Полученные результаты согласуются с ранее полученными данными (Токарев и др., 2024). Среди подземных вод наиболее легкий изотопный состав отмечен в подземных водах на поле, что связано с повышенным уровнем инфильтрационного питания в весенний период на пашне. Наиболее тяжелый – обнаружен в водах скважины, пробуренной на четвертой надпойменной террасе, где за последние 50 лет, по данным Научного центра изучения Арктики, произошло опускание кровли ММП до глубины 8 м. Последнее объясняется, по-видимому, ростом доли летнего питания вследствие увеличения емкости зоны аэрации.

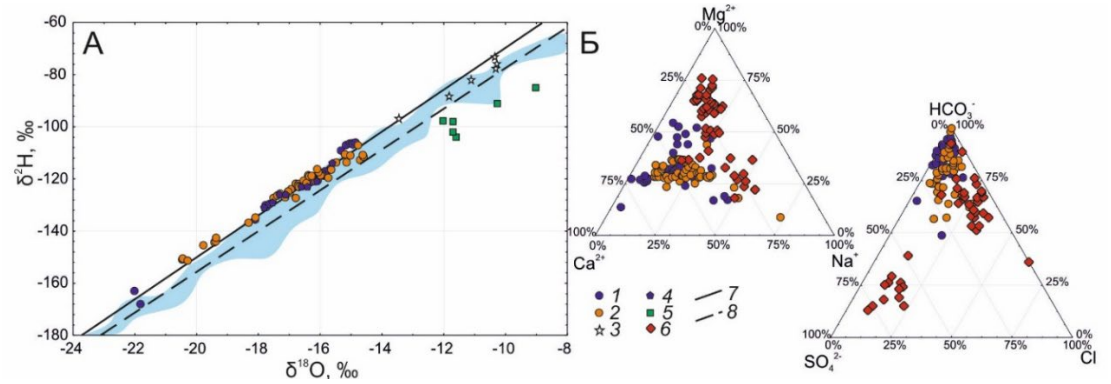


Рис.1. Изотопный (А) и макрокомпонентный (Б) составы природных вод г. Салехард: *1* – подземные воды 2024 г., *2* – поверхностные воды (лето 2023–2024 г.), 3 – дождь (август 2024 г.), 4 – подземные воды 2021 г. (Токарев и др., 2024), 5 – озера (2021, 2024 г.), 6 – поверхностные воды (2002 г.), 7 – глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ), 8 – локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) в г. Салехард в 1996–2000 г (https://nucleus.iaea.org/wiser/explore), на врезке заливкой показана область изотопного состава атмосферных осадков г. Салехард

Стоит отметить важную особенность распределения изотопного состава опробованных водных объектов на дейтерий-кислородной диаграмме. Практически во всех случаях, относящихся к 2023–2024 г. опробованные воды тяготеют к ГЛМВ, а не ЛЛМВ, рассчитанной по данным наблюдений 1996–2000 г (рис.1А.). Обнаруженный эффект может указывать на изменения условий формирования воздушных масс в районе г. Салехард в условиях потепления климата. Дальнейший мониторинг трендов изменения изотопно-геохимического состава водных объектов позволит конкретизировать факторы формирования современного состава природных вод и ранжировать уровни их значимости для дальнейших прогнозов.

Работа проведена в рамках госзадания (тема №FWRZ-2021-0012, ИКЗ ТюмНЦ СО РАН). Лабораторные анализы химического состава вод выполнены ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики». Исследование изотопного состава выполнено в РЦ РДМИ Научного парка СПбГУ в рамках проекта 125021702335-5.

1. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А.- и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // Криосфера Земли, 2020, Т. 24, № 2, с. 15-30.
2. Грязнов О.Н., Абатурова И.В. и др. Отчет по комплексной гидрогеологической, инженерно- геологической и геоэкологической съемке масштаба 1:50 000 листа Q- 42-50-А (Салехард). Екатеринбург, 2004.
3. Токарев И. В., Исаков В. А., Исакова Т.Н. Использование изотопных методов для оценки условий формирования ресурсов и запасов подземных вод // Разведка и охрана недр, 2024, № 1, с. 74-82
4. Colombo N., Salerno F., Gruber S., Freppaz M., Williams M., Fratianni S., Giardino M. Review: Impacts of permafrost degradation on inorganic chemistry of surface fresh water // Global and Planetary Change. 2018. Vol. 162. Pp. 69–83.
5. URL: https://nucleus.iaea.org/wiser/explore/ (Дата обращения 10.02.2025).

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ПЕСЧАНЫХ МАССИВОВ КРИОЛИТОЗОНЫ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ: ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ЕСТЕСТВЕННЫЕ РЕСУРСЫ

Паламарчук В.А[1], Лебедева Л.С.[2], Павлова Н.А.[2]
[1] Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Москва
[2] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
palamarchuk97@inbox.ru

В настоящее время в областях развития многолетнемерзлых пород (ММП) проблема водоснабжения населенных пунктов до сих пор актуальна. Это связано как с природными особенностями арктических территорий (ограниченность подземных вод из-за широкого развития криогенных водоупоров), так и с вызванной потеплением климата деградацией мерзлоты, которая приводит к существенным изменениям гидрогеологических условий (Jin et al., 2022). В Восточной Сибири водоносные горизонты с большими запасами пресных подземных вод известны в областях распространения песчаных массивов (тукуланов – в Якутии). Первые и почти единственные данные об условиях подземного стока дюнных массивов криолитозоны были получены в 1970-1980-ые гг. (Бойцов, Шепелев, 1976; Кулебякин, 1984). Цель нашего исследования – изучение современных условий подземного стока песчаных массивов криолитозоны Восточной Сибири, а также оценка их трансформации в связи с потеплением климата. В летние периоды 2021-2024 гг. на тукулане Махатта (Центральная Якутия) и урочище «Пески» (Забайкалье) проведено опробование подземных и поверхностных вод для изучения их химического и изотопного состава, а также замеры расходов воды родников и образованных ими ручьев. Аналитические исследования водных проб выполнены в лабораториях ИМЗ СО РАН (г. Якутск) и в ИПТМ РАН (г. Черноголовка). Естественные ресурсы подземных вод определены по данным наблюдений за дебитами родников.

Подземные воды тукулана Махатты и урочища «Пески» имеют схожий макрокомпонентный состав. Эти воды нейтральные и слабощелочные, мягкие, гидрокарбонатные преимущественно магниево-кальциевые и кальциево-магниевые, кальциевые с минерализацией до 160 мг/л. Воды тукулана Махатта весьма пресные, их минерализация, как правило, не превышает 50 мг/л. Для них характерны высокие концентрации суммарного железа, при этом они обеднены микрокомпонентами. Почти за 45-летний период их макрокомпонентный состав не изменился. Результаты изотопного анализа указывают на тесную гидравлическую связь подземных вод тукулана с атмосферными осадками и поверхностными водами. Их осредненный состав (‰): $\delta^{18}O$=-21,19±0,44; $\delta^{2}H$=-164,58±3,57; dexc=4,93±0,74. Подземные воды тукулана Махатта формируются водами метеорного происхождения.

Воды урочища «Пески» отличаются большей минерализацией (30-160 мг/л), повышенными содержаниями фтора (до 4 мг/л) и богатым микрокомпонентным составом (Mn, Fe, Li, Mo, V, Sb, иногда As). Впервые изучен изотопный состав родниковых вод урочища. Их осредненный состав следующий, ‰: $\delta^{18}O$=-16,95±0,69; $\delta^{2}H$=-130,20±4,42; dexc=5,40±1,38. Результаты исследований указывают на то, что подземные воды урочища формируются при смешении метеорных вод эоловых и озерно-аллювиальных отложений с более минерализованными подмерзлотными водами флювиогляциальных отложений. Близость изотопного и химического составов подземных вод урочища «Пески» и вод р. Средний Сакукан позволило предположить, что подмерзлотные воды, участвующие в формировании родников, имеют связь с ледниковыми водами хребта Кодар. Их гидравлическая связь может происходить через многочисленные талики, а обогащение фтором и микроэлементами – при взаимодействии с вмещающими горными породами. За последние 40 лет подземные воды урочища «Пески» стали менее минерализованными, понизились содержания $Na^{+}+K^{+}$, Cl^{-} и F^{-}, что мы связываем с увеличением доли ледникового питания.

В то время как на большей территории криолитозоны повсеместно наблюдаются процессы деградации ММП (Jin et al., 2022), на песчаных массивах, как на закреплённых (Гагарин и др., 2023), так и на перевеваемых (Паламарчук и др., 2023) наблюдается новообразования мерзлоты. Это происходит из-за зарастания поверхности песчаных массивов растительностью, что приводит к увеличению площади мерзлых пород и понижению их температуры. По результатам наших наблюдений, на тукулане Махатта из-за зарастания поверхности массива растительным покровом происходит уменьшение родниковой составляющей разгрузки подземных вод (Паламарчук и др., 2023). Так, дебит родников западной части тукулана в первой половине июля 2021 г. составлял около 690 л/с, что меньше по сравнению с данными 1973-1974 гг. (770-930 л/с) (Бойцов, Шепелев, 1976). Полевые работы и результаты визуального дешифрирования поверхности урочища «Пески» показали, что здесь также отмечается увеличение растительного покрова. Однако, если на тукулане Махатта зарастание происходит в основном за счет увеличения плотности и площади сосновых лесов, то на урочище «Пески» наблюдается формирование лиственничных рощ у подножья

подветренных склонов, а также увеличение злаково-бобовоосоковых растительных группировок. Влияние зарастания поверхности урочища на ресурсы подземных вод оценить сложно, так как в их формировании участвуют подмерзлотные воды. В 1976-1981 гг. суммарный летний дебит родников урочища «Пески» составлял около 400 л/с (Кулебякин, 1984). В июле 2022-2024 гг. суммарный расход ручьев Аленушка и Песчаный изменялся в пределах 550-730 л/с. Колебания расходов воды могут быть связаны как с увеличением поверхностного стока в многоводные годы, так и с увеличением подмерзлотного питания.

Таким образом, подземные воды рассматриваемых песчаных массивов имеют схожий макрокомпонентный состав. Особенности их микрокомпонентного и изотопного состава указывают на различные условия формирования ресурсов подземных вод и ответную реакцию водоносных горизонтов на потепление климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда (проект № 25-17-20036).

1. Бойцов А.В., Шепелев В.В. Мерзлотно-гидрогеологические условия массива развеваемых песков Махатта (Центральная Якутия) // Гидрогеологические исследования криолитозоны. Якутск, ротапринт ИМ СО АН СССР, 1976, с. 25–34.

2. Гагарин, Л.А., Оленченко В.В., Павлова Н.А. О причинах затухания термосуффозионных процессов на бестяхской террасе р. Лены в Центральной Якутии //Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2023, № 5, с. 28-42.

3. Кулебякин В. В. Отчет гидрогеологического отряда Режимной партии по работам за 1983 год. «Читагеология»: Чита, 1984, 74 с.

4. Паламарчук В.А., Лебедева Л.С., Павлова Н.А., Хайруллин Р.Р., Баишев Н.Е. Современное состояние источников подземных вод песчаного массива Махатта, Восточная Сибирь // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 4, с. 24–36.

5. Jin, H., Huang, Y., Bense, V. F., Ma, Q., Marchenko, S. S., Shepelev, V. V., Hu, Y., Liang, S., Spektor, V. V., Jin, X., Li, X., & Li, X. (2022). Permafrost Degradation and Its Hydrogeological Impacts. Water (Switzerland), 14(3), Article 372.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Торговкин Н.В.[1], Сивцев Д.Е.[1], Лыхота Н.И.[1], Спектор В.В.[1], Майер Х.[2]
[1] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
[2] Институт им. Альфреда Вегенера, Потсдам, Германия
TorgovkinNV@mpi.ysn.ru

На территории института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в г. Якутске совместно с институтом им. А. Вегенера с сентября 2017 года по настоящее время ведутся наблюдения за изменением состава стабильных изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках. За весь период наблюдений было отобрано и проанализировано 271 образцов снега (n-195) и дождя (n-76). Определены содержания стабильных изотопов кислорода-18 ($\delta^{18}O$), дейтерия (δD) и дейтериевый эксцесс (d_{exc}) относительно глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ). Рассчитаны локальные линии метеорных вод (ЛЛМВ) для холодного и теплого сезонов (рис. 1).

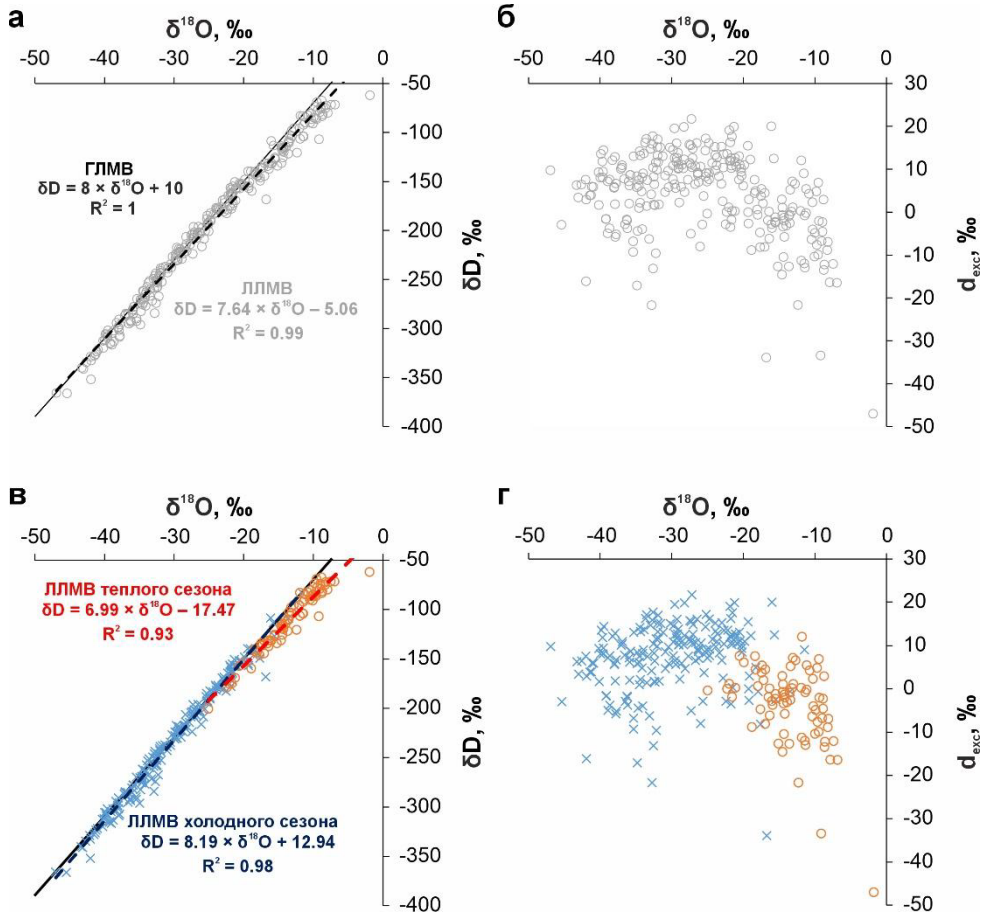


Рис. 1. Изотопный состав атмосферных осадков г. Якутска: а) $\delta^{18}O$/ δD, б) $\delta^{18}O$/ d_{exc}, в) $\delta^{18}O$/ δD по сезонам, г) $\delta^{18}O$/ d_{exc} по сезонам.

Для определения источников влаги была применена модель HYSPLIT при помощи которой можно вычислить обратные траектории движения атмосферной влаги. ˚С. За весь период наблюдений источниками атмосферных осадков являются: северо-западный (СЗ) перенос, преимущественно западная часть акватории Северного Ледовитого океана – 36 %, западный (З) перенос, акватория Атлантического океана – 17 %, восточный (В) перенос, акватория Тихого океана – 17 %, южный (Ю) перенос, преимущественно Каспийское море – 17 % и юго-западный перенос (ЮЗ), крупные внутриконтинентальные бассейны оз. Байкал – 14 % (рис. 2).

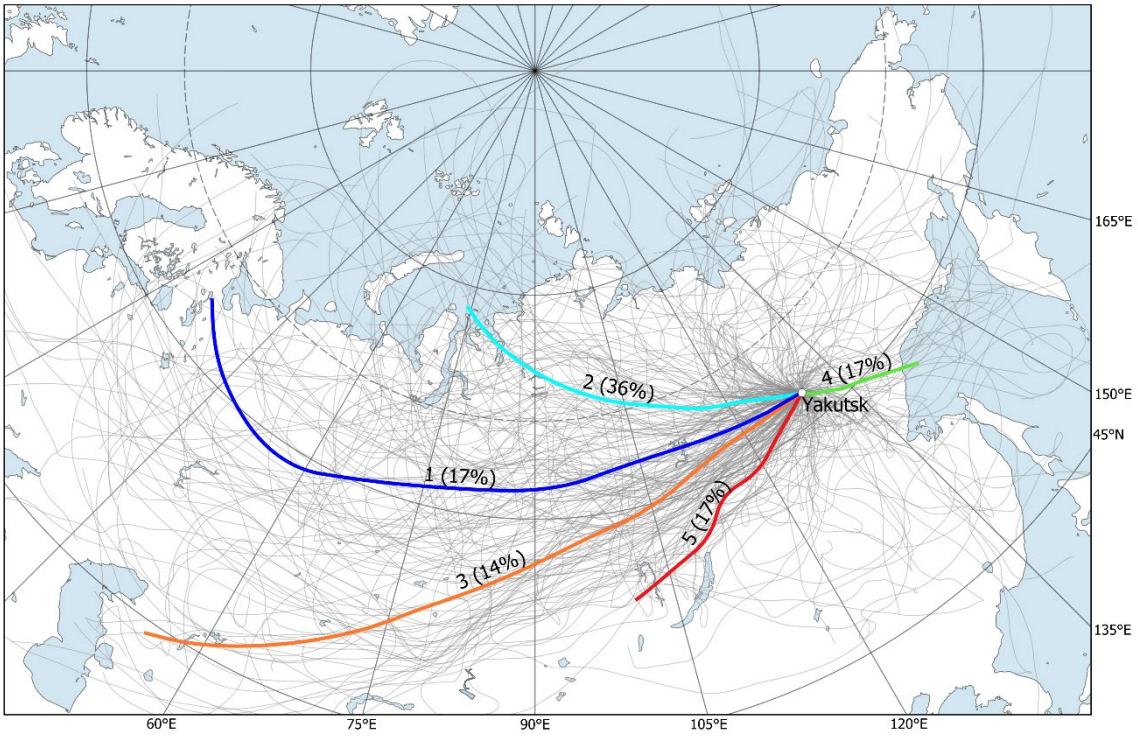


Рис. 2 Схема распределения источников влаги в атмосферных осадках на примере г. Якутска в период сентябрь 2017 г. - февраль 2024 г.

Для холодного сезона доля СЗ переноса возрастает до 40 %, а З переноса до 21 % ЮЗ до 17% доля Ю переноса сокращается до 13%, а В переноса до 9 %.

В теплый сезон это соотношение меняется, преобладание В переноса в атмосферных осадках возрастает до 37 %, Ю и СЗ направления по 26 %, З – 7 % и ЮЗ – 4 %.

Благодарность. Работа выполнена в рамках реализации проекта НИОКТР 122011800064-9 “Строение и ключевые этапы эволюции криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене”.

РАСШИРЕНИЕ ПЛОЩАДИ НАДМЕРЗЛОТНЫХ ТАЛИКОВ В ЮЖНОЙ КРИОЛИОЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Халимьянов А.З.[1], Дроздов Д.С.[1,2], Гравис А.Г.[1,2], Гравис М.В.[1,3], Пономарева О.Е.[2,1], Устинова Е.В.[1,4]
[1] ИКЗ ТюмНЦ СО РАН,
[2] МГРИ,
[3] МГУ,
[4] Тюменский индустриальный университет.
Alfa2066@yandex.ru

Исследования выполнены на двух стационарах ИКЗ Тюм НЦ СО РАН, расположенных в северной тайге и южной лесотундре Западной Сибири (Надым и Уренгой южный) в южной криолитозоне. Сплошность многолетнемерзлых пород (ММП) меняется на этой территории от прерывистой (в центральных частях озерно-аллювиальных и морских равнин, речных террас) до островной (на придолинных дренированных поверхностях) [2]. Сквозной талик мощностью до 155 м существует под руслом р. Надым и, местами, на пойме [4]. Участки с глубоким залеганием кровли (или отсутствием) ММП встречаются в заболоченных ложбинах стока, под массивами перевеваемых песков [3,4], на песчаных залесенных участках террас. По данным [1] мощность ММП с юга на север увеличивается с 250 до 350 м.

Несквозные талики мощностью до 90 м установлены под малыми реками, озерами. Мощность последних варьирует от первых метров до ста. Под крупными озерами (площадью более 4 км² и глубиной более 6–8 м) мощности несквозных таликовых зон могут достигать 72–104 м [4].

О надмерзлотных таликах на участках с глубоким залеганием кровли ММП в фондовой и опубликованной литературе данных приводится мало. Эти участки никогда не являлись основным, специальным объектом исследований, поскольку, считалось, что практического значения они не имели. Исследования последних лет позволяют утверждать, что площадь этих участков в южной криолитозоне непрерывно увеличивается под влиянием потепления климата, на них формируется единый водоносный горизонт надмерзлотных вод торфяников и заболоченных ложбин стока, который не промерзает (и даже приобретает напор) в зимнее время, при определенных условиях может оказывать негативное влияние на развитие инженерно-геологических процессов, представлять угрозу для сооружений. Его влияние на температурное поле пород может быть неоднозначным и сложно учитываемым, а потому трудно прогнозируемому и, совершенно очевидно, что распространение и режим этого водоносного горизонта следует изучать.

Первые данные о появлении надмерзлотных таликов на плоских торфяниках появились в конце XX, начале XXI веков. Сейчас стремительное расширение их площади зафиксировано на всех указанных выше объектах мониторинга деятельного слоя. Появлению таликов предшествует повышение температуры в слое годовых колебаний и увеличение глубины сезонного протаивания пород в результате потепления климата. В конце XX века на этих торфяниках существовали локальные, площадью до 1 или нескольких квадратных метров незначительные понижения кровли ММП, в пределах которых существовали разобщенные маломощные линзы надмерзлотных вод. На рубеже XXI века, было отмечено расширение площади этих участков, их объединение, дальнейшее понижение кровли ММП (увеличение мощности водоносного горизонта), формирование единого горизонта надмерзлотных вод торфяников и ложбин стока. Эти данные получены в ходе мониторинга мощности деятельного слоя, подтверждены геофизическими исследованиями, бурением и температурными наблюдениями в специальных скважинах, оборудованных для изучения темпов промерзания пород деятельного слоя. Эти данные первоначально вызвали удивление, поскольку противоречили известному положению о том, что торфяники являются урочищами, наиболее устойчивыми к потеплению климата. Противоречие было устранено в ходе дополнительных исследований на новых объектах наблюдений. Было установлено, что формирование таликов происходит на торфяниках с маломощным органогенным слоем и угнетенным моховым покровом или отсутствием напочвенного покрова. В современных условиях северной тайги образование таликов происходит на участках с мощностью торфа и мохового покрова общей мощностью менее 0,5 м. В условиях южной лесотундры мощность органогенного слоя может быть меньше.

Во всех выявленных случаях, водовмещающими породами являются пески разного состава, иногда содержащие маломощные линзы супесей и суглинков (рисунок 1).

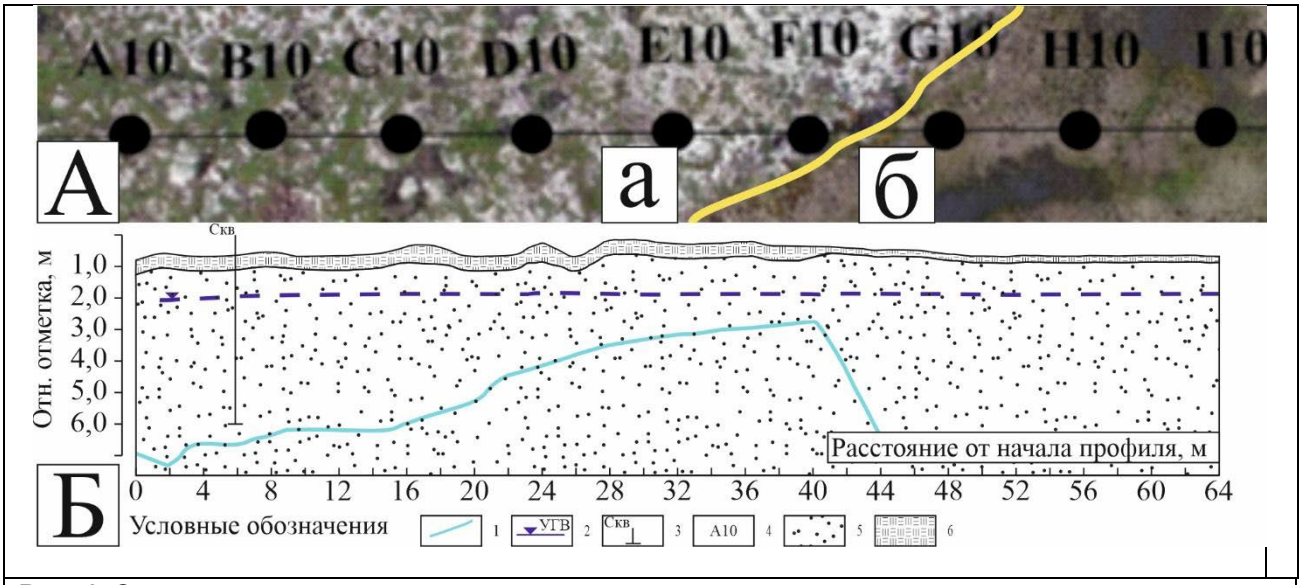


Рис. 1. Схематический разрез

А – Ряд пикетов наблюдательной площадки, пересекающий а) плоский торфяник и б) заболоченную ложбину стока, (на космическом снимке). Б – Схематический разрез, построенный по результатам бурения скважины и данным интерпретации геофизических исследований. 1- кровля ММП; 2 - уровень подземных вод; 3 – скважина; 4 – номер пикета; 5 – пески; 6 - торф

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ 25-27-00144 и логистической помощи Центра изучения Арктики.

1. Агалаков С.Е., Кузовков А.А., Озирная Е.Т., Плавник А.Г. Региональные построения карт мощности криолитозоны и подошвы интервала стабильности газогидратов Западной Сибири // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 8. С. 46–55. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-8-46-55DOI: 10.24412/2076-6785-2023-8-46-55

2. Геокриологическая карта СССР: Масштаб 1:2 500 000 / Кондратьева К.А., Афанасенко В.Е., Гаврилов А.В., Дунаева Е.Н., Замолотчикова С.А., Труш Н.И., Лисицына О.М., Трофимов В.Т. и др. – М.: ГУГК, 1991 (отпечатано 1996).

3. Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции. /Мельников Е.С., Вейсман Л.И., Москаленко Н.Г. и др.-Новосибирск: Наука, 1983 165 с.

4. Савинцев И. А. Инженерно-геологические условия долинных областей криолитозоны ЯНАО (на примере Салехардской и Надымской площадей) Специальность 25.00.08 – «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение»: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук Екатеринбург – 2012, 25 с.

О ВЕРОЯТНОМ МЕХАНИЗМЕ РАЗВИТИЯ ДОЛИН МАЛЫХ РЕК ПРИЛЕНСКОГО ПЛАТО НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ШЕСТАКОВКИ

Шамов В.В.[1,2], Гарцман Б.И.[2,3], Лебедева Л.С.[1], Гагарин Л.А.[1], Павлова Н.А.[1], Христофоров И.И.[1]

[1] *Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск*

[2] *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток*

[3] *Институт водных проблем РАН, Москва*

vlshamov@yandex.ru

На основе теории эрозии Хортона, принципа единства природных вод и гипотезы А.А. Галанина о криогенно-эоловом происхождении надмерзлотных субаэральных таликов в песчаных массивах (Galanin, 2017) предлагается обсудить предполагаемый механизм развития современных долин малых рек, дренирующих ландшафты Приленского плато. Современные надмерзлотные субаэральные водоносные талики, подробно исследованные в закрепленных сосновым лесом песчаных отложениях в бассейне р. Шестаковки в 2017–2024 гг., могут быть представлены как особая разветвленная сеть предпочтительных водопроводящих путей (ПВП), обеспечивающих питание реки в летний меженный период и проявляющихся в зимний период в виде склоновых наледей, нарастающих под действием криогенного напора.

Формирование такой сети восходит к проблеме происхождения надмерзлотных субаэральных водоносных таликов на высоких террасах рек Лены и Вилюя. Одна из авторитетных теорий основана на предположении о глубоком многолетнем протаивании песчаных отложений, замороженных в плейстоцене, во время теплого бореального оптимума в первой половине голоцена, и последующем частичном поверхностном промерзании в холодной второй половине голоцена (криогенные бассейны, согласно Н.Н. Романовскому, 1983). Но есть некоторые моменты в этой теории, которые требуют дополнительной проверки и обоснования. А.А. Галанин считает, что известные теплофизические свойства песчаных отложений ставят под сомнение возможность их протаивания на глубину до 100 м за несколько тысяч лет, учитывая, что весь песчаный массив был глубоко проморожен в последний криохрон (MIS-2) (Galanin, 2017). При этом в песчаных массивах не обнаружено признаков вторичной мерзлотной деформации (криогенной турбулентности) исходной стратификации грунта, что типично при оттаивании мерзлоты. Более того, другие мерзлые отложения в прилегающих ландшафтах, в том числе отложения ледового комплекса, не демонстрируют признаков значительной деградации в оптимум голоцена (Павлова и др., 2024). Можно предположить, что величина теплопроводности песчаных отложений не достаточна не только для гипотетического оттаивания, но и для повторного замерзания в позднем голоцене. Сомнительна значительная роль конденсации в первоначальном формировании таликов, которую в питании современных таликов тукулана Махатта В.В. Шепелев (1981, 1987) указывал как основной источник и связывал со свободным поступлением влажного (?) атмосферного воздуха в зону аэрации вниз по термическому градиенту. Вместе с тем, конденсация с выделением тепла характерна для грубодисперсных отложений в верхней части профиля (Основы геокриологии..., 2001), тогда как эоловые пески тукуланов отнесены к тонкодисперсным пескам (Калинин, Якупов, 1989).

В эпоху сухого холодного доголоценового климата древняя эрозионная сеть в районе современной р. Шестаковки была засыпана песками в силу доминирования эолового процесса. В докладе воспроизведены пять стадий деградации дренажной сети, предложенные А.А. Галаниным (Galanin, 2017) на примере тукуланов в низовьях Вилюя в течение MIS-2. В процессе такой деградации поверхностные (русловые) водные потоки превращались в подземные, что согласно (Основы геокриологии..., 2001) сопровождалось дисперсией водного потока с отепляющим эффектом области фильтрации и формированием / сохранением талика, который, вероятно, можно отнести к гидрогеогенному типу.

При потеплении и увлажнении климатического фона от MIS-3 к голоцену количество воды в районе р. Шестаковки постепенно увеличивалось, при этом помимо эолового процесса становились вполне вероятными также процессы суффозии и/или термосуффозии. Насыщение водой участков дюн, приуроченных к древним (перекрытым песками) долинам и ложбинам стока, усиливает мощность потока надмерзлотных вод. Общий поток воды в бассейне древней р. Шестаковки становится достаточно большим, чтобы частично вынести песчаные массы вниз по течению (эрозия активизируется!) и сформировать новую, наложенную долину реки в закрепляющихся голоценовой растительностью песчаных массивах.

Авторами на основе анализа космоснимка Aster разрешения 30 м предложены четыре гипотетические стадии развития русловой сети р. Шестаковки в условиях конкуренции за площадь дренирования согласно теории Хортона. Это при условии, что базис эрозии р. Шестаковки устойчиво

понижается, что обусловило в прошлом речной перехват некоторой части водосбора р. Кенкеме и увеличению общей дренируемой площади р. Шестаковки.

Геофизические исследования распространения водоносных таликов в бассейне р. Шестаковки позволяют рассматривать их как сеть подземных «труб», каналов или полостей, по которым вода предпочитает двигаться и в теплое время года после спада половодья служит ключевым источником питания реки. Псевдотрехмерное изображение таликов вдоль двух пересекающих профилей по георадарным данным показывает явно неровную поверхность кровли мерзлоты, подстилающей таликовый водоносный горизонт (Лебедева и др., 2023). Можно предположить, что понижения этой поверхности соответствуют преимущественным водопроводящим путям и/или древним ложбинам стока, которые были заполнены песком в плейстоцене.

Современное гидрогеологическое состояние бассейна р. Шестаковки не позволяет считать эрозионные процессы здесь ведущими. Но при этом можно наблюдать признаки постепенного термоэрозионного увеличения русловых расширений в среднем течении реки (Шамов и др., 2023). Также нужно подчеркнуть, что требуются более веские подтверждения гипотетического механизма развития долины р. Шестаковки, а также гипотезы происхождения субаэральных надмерзлотных таликов в песчаных массивах региона.

Работа выполнена при поддержке РНФ и Якутского научного фонда (проект 25-17-20036).

ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДОТОКОВ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ Р. КОЛЫМА НА ПИКЕ И СПАДЕ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ

Шулькин В.М., Давыдов С.П., Давыдова А.И.
Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
shulkin@tigdvo.ru

Река Колыма – единственная крупная река мира, бассейн которой полностью расположен в зоне многолетнемерзлых пород (ММП). Несмотря на значительный прогресс в изучении химического состава вод р. Колымы, в том числе и микроэлементного, масштабы и причины изменчивости химического состава вод р. Колымы на пике половодья, который для многих арктических рек является периодом, дающим 2/3 и более годового стока, практически не изучены. Это затрудняет корректную оценку среднего уровня концентрации и потока в море, а также прогноз возможного влияния трансформации ММП вследствие климатических изменений. Ещё меньше данных по химическому составу пойменных водотоков низовьев р. Колыма, которые, судя по другим арктическим рекам с наличием ММП на водосборах, во многом определяют сезонные изменения химического состава в основном русле. Целью представляемой работы является характеристика изменения концентрации химических элементов от Li до U в растворенных/коллоидных (<0.45 мкм) и взвешенных (>0.45 мкм) формах миграции в основном русле и крупных притоках нижнего течения р. Колыма (п. Черский), в типичном пойменном водотоке р. Пантелеихе, и в малом водотоке первого порядка, дренирующем ММП, с момента пика весеннего половодья в начале июня до начала летней межени в середине июля 2024 г. Кроме элементного состава вод, определяли температуру, pH, электропроводность (EC), которая пропорциональна общей минерализации (TDS), растворенный органический углерод (РОУ), а также содержание взвеси гравиметрически, и содержание крупных коллоидов (0.05-0.45 мкм) в фильтратах по величине интенсивности динамического рассеяния света (ДРС). Водный режим в период отбора оценивали по данным гидропоста Нижнеколымский. Для характеристики места рассматриваемого весеннего паводка 2024 г. в общем гидрологическом цикле р. Колымы, использовали данные по проводимости, температуре и РОУ в основном русле реки с мая по октябрь в 2014 и 2015 гг.

Изменение общих гидрохимических параметров в водотоках нижней Колымы в половодье 2024 г. характеризовалось минимумом EC и максимумом РОУ на пике половодья, и выраженной тенденцией увеличения EC и снижения содержания РОУ на спаде половодья в основном русле р. Колыма. Содержание взвеси также было максимально на пике половодья, резко уменьшалось в начале спада половодья, с постепенным снижением далее, но в начале июля вновь возрастало на фоне летнего дождевого паводка, наблюдавшегося у п. Черский.

Общий характер изменения EC и РОУ на фоне изменения расхода воды в половодье 2024 г. соответствовал картине, наблюдавшейся в 2014-2015 гг. В тоже время скорость увеличения EC на спаде половодья в 2024 г. была заметно быстрее. Поскольку изменение расхода воды и температуры на спаде половодья в 2024 были также быстрее, очевидно, что интенсивность половодья является главной причиной межгодовых различий динамики EC. В тоже время динамика снижения РОУ на спаде половодья 2024 гг. и 2014-2015 гг. практически совпадала, что отражает различные источники формирования стока РОУ и макроионов.

Пойменные водотоки (р. Пантелеиха) на пике половодья 2024 г. были близки по составу водам основного русла р. Колымы и крупных притоков (р. Анюй) за исключением пониженного содержания взвеси. Однако на спаде половодья EC (и минерализация) в пойменных водотоках росла, а содержание РОУ и взвеси снижалось не так быстро, как в основном русле, в соответствие с меньшей скоростью водообмена.

Кроме того, на спаде половодья в водотоках низовьев р. Колымы в составе фильтратов 0.45 мкм, которые включают растворенные/коллоидные, в том числе крупно-коллоидные (0.05-0.45 мкм) формы элементов, наблюдались значимые изменения концентрации многих химических элементов.

Ведущей тенденцией изменения химического состава вод основного потока р. Колыма на спаде половодья является увеличение минерализации (TDS), а значит концентрации макроионов и ряда следовых элементов (Li, Sr, Ba). Наиболее вероятная причина – снижение роли талых вод снежного и ледового покровов, которая очевидно максимальна на пике половодья. В р. Пантелеиха, а также, вероятно в других пойменных водотоках, заполняемых во время половодья, увеличение минерализации при спаде воды происходит заметно медленнее, чем в основном русле р. Колыма, что свидетельствует о меньшей скорости водообмена.

Другим процессом, наблюдаемым в водах нижней Колымы на спаде половодья, является снижение содержания крупных коллоидов (0.05-0.45 мкм), что фиксируется по уменьшению интенсивности рассеяния ДРС в фильтратах. При этом динамика изменения содержания крупных

коллоидов в основном русле р. Колыма и в пойменных водотоках достаточно близка, несмотря на очевидное различие условий водообмена. Концентрация в фильтратах вод основного русла р. Колыма таких элементов как Fe, Al, Ti, REEs, элементов-гидролизатов Th, Zr, Hf и др., а также Zn, Cu, Ni, Cd снижается одновременно с уменьшением содержания крупных коллоидов < 0.45 мкм, что указывает на контролирующую роль крупных коллоидов в миграции этих элементов в основном потоке р. Колыма на спаде половодья.

Судя по снижению содержания крупных коллоидов 0.05-0.45 мкм, в пойменных водотоках также должно происходить уменьшение концентрации элементов, мигрирующих в составе крупных коллоидов. Однако, в р. Пантелеиха значимое снижение в июне наблюдается только для Al и REEs. Для остальных элементов-гидролизатов, а также для Cu, Ni, Cd снижение концентрации в фильтратах 0.45 мкм частично или полностью компенсируется, и уменьшается только в июле при дождевых паводках, когда в русло р. Пантелеиха заходит вода из основного русла р. Колымы и/или из р. Анюй. Более того, для Fe, Mn, Co, As, Rb в р. Пантелеиха в июне наблюдается существенное увеличение концентрации (в 5-15 раз) по сравнению с пиком половодья. То, что это увеличение происходит на фоне снижения содержания крупных коллоидов указывает на то, что имеет место дополнительное поступление этих химических элементов в пойменные водотоки в виде растворенных и/или мелких коллоидных форм, вероятно из пойменных ландшафтов и с мелкими притоками. Источником этого дополнительного поступления может быть сезонное оттаивание вечномерзлых отложений, либо мобилизация из современного сезонно замерзающего верхнего почвенно-растительного слоя. Судя по тому, что в р. Пантелеиха в июне не наблюдалось повышения концентрации в фильтрате 0.45 мкм REEs, Hf, Th, Cd, U – элементов, которыми плейстоценовые ММП наиболее обогащены, вероятная основная причина концентрирования Fe, Mn, Co, As, Rb в пойменных водотоках – оттаивание и мобилизация химических элементов из частично переработанного в прошлый сезон материала современного почвенно-растительного покрова. Для Mn и Co возможна дополнительная мобилизация растворенных форм из донных отложений и обводненных почв за счет восстановительных процессов.

В отличие от растворенных и коллоидных форм, удельная концентрация большинства химических элементов во взвеси основного русла р. Колыма, не демонстрирует значимого изменения во время половодья, а сток взвешенных форм контролируется сезонными вариация содержания взвешенного материала. Однако, во взвеси пойменных водотоков фиксируется аутигенное накопление Mn, Co, Fe, P.

ДИНАМИКА ПЛОЩАДИ НАЛЕДЕЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ СНИМКОВ (2002–2022 ГГ.)

Ю. Мяо[1,2], Н.А. Павлова[1]

[1] Институт мерзлотоведения им П. И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

[2] Факультет водного хозяйства и электроэнергетики, Хэйлунцзянский университет, Харбин, Китай.

hss_yumiao@126.com

В области криолитозоны на фоне наблюдаемого потепления климата изменяются условия питания и разгрузки подземных вод, активизируется их связь с поверхностными водами (Мониторинг…, 2002). Одним из показателей трансформации мерзлотно-гидрологических условий являются наледи (Толстихин, 1974, Алексеев, 2007). В Центральной Якутии эти природные образования встречаются преимущественно в области распространения песчаных отложений и связаны с разгрузкой подземных вод таликов.

Цель выполненных исследований – оценить изменчивость ресурсов подземных вод зоны свободного водообмена IV (бестяхской) надпойменной террасы р. Лены по данным дистанционных исследований наледей. Район исследований расположен на правобережье реки в Центральной Якутии (от 129°00' в.д. до 130°00' в.д., от 61°30' с.ш. до 61°58' с.ш.). Бестяхская терраса сложена четвертичными песками с галькой в основании. Основная часть сформирована перигляциальным аллювием, покрытым эоловыми отложениями. Мощность четвертичных образований варьирует от 20 до 86 метров. В песчаных отложениях широко распространены водоносные субаэральные надмерзлотно-мерзлотные талики различной мощностью с пресными подземными водами. Разгружаясь на поверхность, эти подземные воды формируют наледи.

Для оценки динамики площади наледей использованы данные спутниковых снимков Landsat 4-5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI и Landsat 9 OLI + Collection 2 Level-1 Tier 1 и Tier 2 за весенние периоды с 2002 по 2022 год. Для идентификации наледей применен трехступенчатый метод дистанционного зондирования с использованием математической обработки изображений. Метод основан на различиях в отражательной способности и электромагнитном излучении между жидкой и твердой фазами воды. На первом этапе применялся нормализованный индекс различия снежного покрова (NDSI, порог 0.4) для разделения снега, льда, почвы и облаков. Затем использовался индекс максимальной разности льда (MDII, порог 0.144) для отличия льда и снега от воды. Для исключения льда на озерах и реках применялась водная маска, рассчитанная с помощью нормализованного разностного водного индекса (NDWI) на основе осенних снимков Landsat. В результате были сохранены только наледи, образованные подземными водами.

В рассматриваемый период суммарная средняя площадь исследуемых наледей составила 3.55±0.37 км², при этом прослеживалась общая тенденция увеличения их площади со средним темпом роста 0.06 км^2 в год. В целом, в исследуемом районе площадь всех наледей была наименьшей в 2002 и 2010 гг., после относительно засушливых лет (в 2001 и 2002 гг. сумма летних атмосферных осадков была 81-88 мм, а в 2009 и 2010 гг. – 112-133 мм при норме 156 мм,). В эти годы суммарная площадь наледей составила всего 1.6±0.16 км^2. В 2019 году она достигла максимального значения 5.13±0.53 км^2. Причем на ее площадь бóльшее влияние оказали не атмосферные осадки предыдущего года, а температура воздуха зимой, которая была самой высокой за рассматриваемый промежуток времени.

Если рассматривать каждую наледь отдельно, установлено, что их размеры на различных участках варьируются от 0.18±0.01 до 2.18±0.15 км^2 (Рисунок). Среди них площадь наледи Бятей изменяется наиболее значительно, стандартное отклонение её площади за исследуемый период составляет 0.45 км^2. Площади наледей Менденский и Ютэлиир из года в год практически постоянны, их стандартное отклонение составляет всего 0.02 км^2. Вероятно, на степень изменчивости площади наледей, помимо ресурсов подземных вод и температуры воздуха, влияют и морфологические особенности зоны разгрузки.

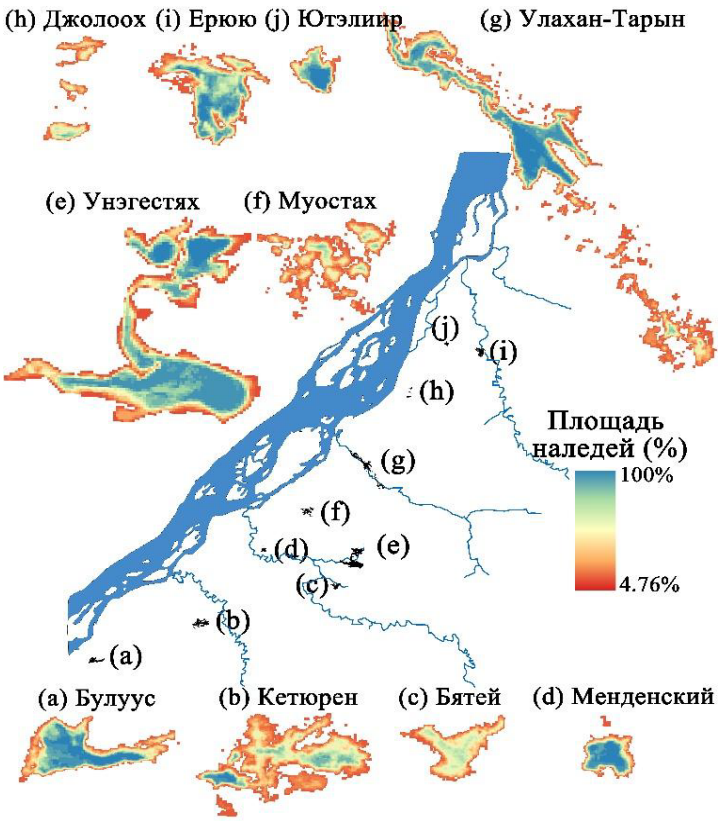


Рисунок 1. Вероятность покрытия поверхности земли наледями в Центральной Якутии в 2002-2022 гг.

Таким образом, разработанный метод дистанционного зондирования, основанный на индексах NDSI, MDII и NDWI, позволил достоверно идентифицировать наледи. Результаты исследования показали, что в рассматриваемый период наледи в Центральной Якутии, имели, в целом, тенденцию к увеличению площади со средним темпом роста 0.06 км² в год. На размеры наледей оказывает влияние степень увлажненности территории: при последующих друг за другом нескольких сухих лет площади уменьшаются. Относительные теплые зимы способствуют растеканию изливающихся на поверхность подземных вод, из-за чего происходит увеличение площади наледей.

Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. – Новосибирск: Наука, 1974. – 164 с.

Алексеев В.Р. Наледеведение: словарь-справочник/Под ред. А.Н. Антипова, В.П. Мельникова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 428 с.

Мониторинг подземных вод криолитозоны/В.В. Шепелев и др. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. – 172 с.

МАЛЫЕ ФОРМЫ ОЛЕДЕНЕНИЯ ГОР БЫРРАНГА, БАЙКАЛЬСКИХ ХРЕБТОВ И КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ

М.Д. Ананичева[1], А.А. Абрамов[1], М.М. Адаменко[2]
[1] *Институт географии РАН, Москва*
[2]*Сибирский индустриальный университет, Новокузнецк*
maranan@gmail.com

Горное оледенение является чувствительным индикатором изменений климата и фактором изменения среды в горах и окружающей предгорной территории. Оледенение арктических горных систем (гор Бырранга, Таймыр) является ярким индикатором изменения климата в высоких широтах, характеризующихся так называемым “арктическим усилением” (Латонин и др., 2020). Районы оледенения изучаемых систем имеют свои особенности, которые важно учесть при оценке значимости и актуальности. Недавно были открыты ледники и малые формы оледенения (МФО) в Верхнеангарском хребте, что позволило вместе с ледниками Байкальского и Баргузинского хребтов говорить о новой байкальской ледниковой системе, район Кузнецкого Алатау недостаточно изучен с точки зрения различения ледников и других криосферных объектов (например, таких как перелетовывающие снежники и каменные глетчеры), ледники Бырранга требуют обновления оценки учета количества и размеров ледников, точного разделения по ледоразделам переметных крупных ледников на основании последних ЦМР.

Оледенение Кузнецкого Алатау представлено малыми формами. Малые ледники Кузнецкого Алатау обладают рядом особенностей и существуют благодаря большому количеству осадков (до 3000–3500 мм/год), более половины которых выпадает в виде снега, а также высокой концентрации снежных масс на подветренном склоне вследствие метелевого переноса. Ледники залегают группами, формируя три района оледенения. Они были каталогизированы в 70–80 гг. П.С. Шпинем. В дальнейшем прямые полевые исследования ледников носили эпизодический характер.

В данной работе были получены оценки площадей и высот для всех ледников этого района за 2021 и 2023 гг. по снимкам Sentinel-2.

Оледенение в хребтах северного Прибайкалья приурочено к горным хребтам, окружающими Байкальскую котловину, подстилающие породы находятся в мерзлом состоянии. Район северного Прибайкалья интересен наличием нескольких ледниковых групп, приуроченных к Байкальскому, Баргузинскому и Верхнеангарскому хребтам. Как все малые формы, ледники здесь очень чувствительны к колебаниям климата и уникальны в своем существовании вблизи южной границы криолитозоны. В настоящей работы были оценены площади и характерные высоты ледников этой системы по снимкам Sentinel-2 за 2024.

Горы Бырранга расположены в северной части Таймырского полуострова. Образованы системой параллельно или кулисообразно расположенных цепей гор и обширных волнистых плато.

М.Д Ананичевой была опубликована работа по оценке состояния ледников Бырранга по снимкам Landsat за 2003 г. К 2003 году по расчетам авторов оледенение гор Бырранга с 1967 года уменьшилось примерно на 17%. При сравнении с подобными результатами расчета по снимкам Landsat для ледников СВ Сибири на ту же дату (2003 год), выявлено, что отступание ледников Бырранга примерно такое же, как в районе Сунтар–Хаята, но меньше по скорости сокращения площади ледников хребта Черского, что согласуется с региональными климатическими изменениями. С тех пор ледники Бырранга оценивались в рамках каталога “Ледники России” по снимкам Sentinel-2 2019 г. Этот район изобилует такими же гляциальными объектами как Кузнецкий Алатау и Байкальский регион, но обладает большим количеством ледников и находится в высоких арктических широтах. Предварительная оценка состояния ледников Бырранга по снимкам 2022 г показало, что ледники сильно отступают, распадаются на отдельные части, уменьшаются в количестве.

Нами по Sentinel-2 2023 г в горах *Кузнецкого Алатау* было найдено 135 объектов

– ледников и снежно-ледовых образований (СЛО). Сокращение площади с 1980 года составило 50-75%. В целом, больше всего сократили площадь присклоновые ледники, далее следуют висячие и каровые. По экспозициям: наибольшее сокращение у ледников СВ и В экспозиции, что связано с недостатком питания, у СЛО – С и СВ экспозиции.

Ледники *гор Бырранга* – самые северные континентальные горные ледники, представленные МФО. Они до конца 20-го века находились относительно в стабильном состоянии, но уже к 2003 г. их площадь уменьшилась на 17% (снимки Landsat) по сравнению с Каталогом ледников СССР (1967), а к 2022 г. (Sentinel-2) площадь сократилась на 35-46% (снимки CORONA, 1966) для разных бассейнов, которые были определены для всех групп ледников.

Ледники *Байкальских хребтов (Байкальского, Баргузинского и Верхне-Ангарского)* катастрофически сократили свою площадь за последние два десятилетия. Сравнение площадей,

занимаемых ледниками в 2000 и 2021 гг., показало сокращение с 2 до ~ 0.9 км^2. С 2-21 г ледники еще сократились, часть уже меньше 0,01, общая оставшаяся площадь всего 0,6 км^2.

Таким образом, можно заключить, что климатические изменения в сторону потепления, сказались на размерах малых форм оледенения Сибири в большой степени. Арктические ледники Быранга, не смотря на расположении на крайнем Севере (п-в Таймыр) значительно сократились, малые ледники Байкальской системы занимают на 2024 г лишь 0,6 км2. Скорость убыли площади здесь наибольшая, но и изначальные размеры ледников здесь наименьшие среди изучаемых горных регионов. Ледники и СЛО Кузнецкого Алатау (Южная Сибирь) сократились больше ледников Быранга, но их межгодовая динамика в отличие от ледников Быранга имеет колебательный характер, определяемый соотношением количества принимаемых твердых осадков и силы и направления ветров.

Работа сделана в рамках Гранта РНФ №24-27-00310.

ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДНИКОВ И СНЕЖНИКОВ МУТНОВСКОГО И ГОРЕЛОГО ВУЛКАНОВ (ЮГ КАМЧАТКИ) С 1973 ПО 2023 ГГ.

Стельмах Ю. Ю., Петраков Д. А.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
julia.stelmakh1806@gmail.com

Район вулканов Мутновский и Горелый на юге Камчатки достаточно давно считается одним из самых многоснежных на полуострове. Мутновский вулкан представляет собой довольно крупный для полуострова ледниковый узел. Высокая снежность района обеспечивает также чрезвычайно широкое распространение малых форм оледенения – многолетних снежников, в том числе в переходной к ледникам стадии, и ледников площадью менее 0,1 км2 [1].

В работе представлена оценка изменений площади и массы ледников и снежников вулканов Горелый и Мутновский. Было проведено дешифрирование ледников и снежников на основе снимков спутников Landsat-8 (2013-2017 гг.), Sentinel-2 (2018-2023 гг.), KH-9 (1973 г). При расчете баланса массы использовались фрагменты мозаики ArcticDEM разрешением 2 метра, а также ЦМР, построенная по результатам оцифровки топографической карты масштаба 1:50000 с состоянием местности на 1974 г. Для сопоставления высот разных ЦМР была проведена корегистрация. Расчет балансы массы ледников и снежников проводился путем вычитания растровых значений высоты одной ЦМР из другой в программе ArcGis Pro.

Установлено, что площади ледников Мутновского вулкана сокращались в период с 1973 по 2023 гг. В период с 1973 по 2013 гг. сокращение ледников составило 6,9-81,1 % от площади. В период с 2013 по 2023 гг. сокращения площадей ледников варьируют от 0,1 до 66 %. Некоторые ледники увеличили свою площадь, увеличение площадей ледников варьирует от 3,9 до 21,7 % площади.

Сокращения площадей снежников в период 1973-2013 гг. варьируют от 0,5 до 31,5 % от площади. В период 2013-2023 гг. снежники изменялись активнее, чем ледники, и на всех исследуемых объектах зафиксировано уменьшение площади от 13,9 до 66,7 %.

Баланс массы ледников за исследуемые периоды, за исключением 3 ледников, был отрицательным. С 1974 по 2012 гг. кумулятивный баланс ледников варьировал от -3,23±0,2 до -19,89±1,4 м в. э. С 1974 по 2022 гг. среднее значение баланса массы ледников составило примерно -0,2 м. в. э. в год. Баланс массы ледника Козельский за 1977-2022 гг. составил -0,33 м в. э. в год [2], что в целом сопоставимо со значениями баланса массы на территории исследования. Для периода 2012-2021 гг. был рассчитан баланс массы 10 снежников – за 9 лет отрицательный кумулятивный баланс массы зафиксирован только на 1 снежнике (-0,68 м в. э. или -0,08 м в. э. в год).

Изменения кратерных ледников напрямую зависят от активности вулкана и обвально-осыпных процессов. Состояние внекратерных ледников и снежников зависит от метеопараметров (снежность, температура, количество солнечных дней, господствующее направление ветра) конкретного года. Однако, изменения ледников не во всех случаях обусловлены климатическим фактором. Наиболее заметное изменение – сильное сокращение ледника Тушинского – было вызвано его обвалом после интенсивных дождей в 1997 г.

Многолетние снежники – динамичные формы на коротком промежутке времени, но стабильны в долгосрочной перспективе. Некоторые из исследованных снежников, вероятно, могут рассматриваться как малые ледники, поскольку имеют положительный баланс массы, непрерывно существуют на протяжении нескольких десятков лет, состоят изо льда и имеют трещины движения.

1) Виноградов В. Н., Муравьев Я. Д. Современное оледенение Южной Камчатки //Вопросы географии Камчатки. – 1982. – №8. – С. 27-33

2) Муравьев А. Я., Носенко Г. А., Миронов И. К., Двигало В. Н., Муравьев Я. Д. Баланс массы ледника Козельский на Камчатке за 1977–2022 гг. //Лёд и Снег. – 2023. – Т. 63. – №3. – С. 317-331.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ЛЕДНИКОВ НА БАЛАНС ИХ МАССЫ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕДНИКА АЛЬДЕГОНДА, ШПИЦБЕРГЕН)

Терехов А.В.[1], Демидов В.Э.[1], Прохорова У.В.[1]
[1] Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
antonvterekhov@gmail.com

Баланс массы ледников представляет интерес не только как самостоятельный объект исследования, отражающий их динамику, но и как индикатор климата. Поэтому ледники являются ценным инструментом для изучения климатических процессов, особенно в труднодоступных районах, где отсутствуют или крайне ограничены регулярные наземные метеорологические наблюдения. Однако следует учитывать, что в многолетних рядах данных о балансе массы ледников содержится не только климатический сигнал: данный показатель также зависит от изменяющейся во времени конфигурации ледника и высот его поверхности [1]. Это обусловлено тем, что величина баланса массы зависит от высотного положения: все основные величины, влияющие на баланс, имеют вертикальные градиенты, что касается и температуры воздуха, и влажности, осадков, альбедо, и т.п. С изменением высоты поверхности ледника изменяется и действие этих факторов на него.

Ледники архипелага Шпицберген являются подходящим объектом для оценок вклада климатического и высотного сигнала в абляцию. У большей части ледников Шпицбергена в настоящее время снегонакопление наблюдается лишь на вершинах наиболее обширных куполов, а площадь зоны аккумуляции в результате потепления климата по прогнозу сократится до нуля уже к середине текущего столетия [3].

Не является исключением и ледник Альдегонда (Шпицберген), где с начала 21-го века ведёт масс-балансовый мониторинг ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт». Ледник в настоящее время имеет постоянный отрицательный баланс массы, следствием чего является одновременное уменьшение площади ледника и высоты его поверхности, что подтверждается повторными топографическими и съемками и дистанционным зондированием: за 2002–2020 гг. на поверхности убыло около 22 метров ледникового льда [2].

Таким образом, возникает механизм положительной обратной связи: по мере таяния поверхность ледника понижается, что, в свою очередь, способствует дальнейшему увеличению абляции. Это должно приводить к ускоренному таянию даже при неизменных климатических условиях. Следовательно, выявленный тренд в рядах баланса массы может быть ошибочно интерпретирован как климатический сигнал, связанный с изменениями температуры воздуха или количества твердых осадков. В связи с этим возникает необходимость в количественной оценке сигнала, обусловленного динамикой геометрических параметров ледника.

К примеру, если пересчитать баланса массы ледника Альдегонда за последнее десятилетие (2014–2024 гг.) на основе рельефа его поверхности на 2008 г. (в этот год проводилась детальная аэрофотосъемка), а не используя наиболее актуальные на каждый балансовый год данные, то получится, что ледник теряет на 0.02–0.04 м в.э. больше, чем терял бы с прежней, более высокой геометрией поверхности (Рисунок). Эта величина — «геометрический» сигнал — вносит дополнительный вклад, до 2% в год, в беспрецедентное таяние ледников Шпицбергена последних лет. Это может показаться незначительным, но при расчетах за более длительные промежутки времени, например, тридцатилетней климатической нормы, её вклад возрастёт.

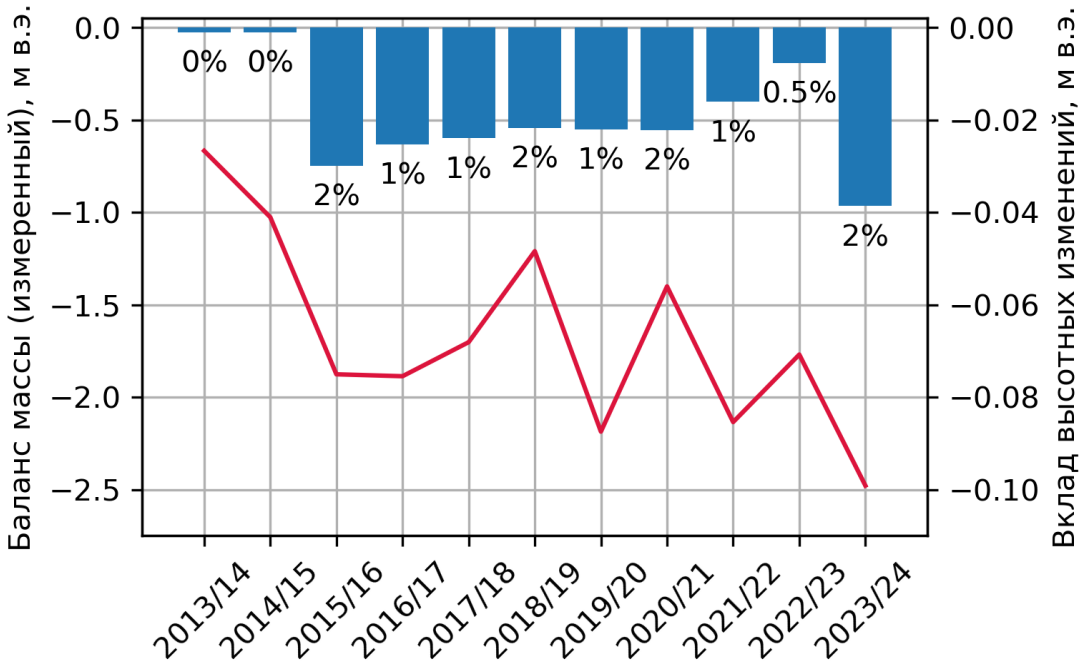


Рисунок. 1. Вклад изменений пространственной конфигурации ледника Альдегонда в баланс его массы. Красной линией показан измеренный баланс массы, синим цветом — вклад высотных изменений

1. Charalampidis, C. et al. (2018). Mass-budget anomalies and geometry signals of three Austrian glaciers. Frontiers in earth science, 6, 218.

2. Terekhov A. et al. (2023). Two decades of mass-balance observations on Aldegondabreen, Spitsbergen: interannual variability and sensitivity to climate change. Annals of Glaciology, 64(92), 225–235.

van Pelt W. J. J. et al. (2021). Accelerating future mass loss of Svalbard glaciers from a multi-model ensemble. Journal of Glaciology, 67(263)

СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЛЕДНИКОВ ВАЛЛЕНБЕРГА, КРУНЕ И МОНАКО ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗА 2017-2023 ГГ.

Трунин Д. А.
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
trunden02@gmail.com

С 1971 по 2019 год среднегодовая температура на Шпицбергене выросла на 3,1°C – в три раза больше среднемирового показателя. Ледники, чувствительные к климатическим изменениям, отражают их через изменения фронта, высоты, массы и скорости движения. Исследование оценивает скорости движения ледников Валленберга, Круне и Монако в 2017-2023 гг. по радиолокационным снимкам. Эти крупные, приливные и пульсирующие ледники выбраны из-за разной экспозиции: Валленберга – восточная, Круне – западная, Монако – северная. Также использованы данные с базы данным ITS_LIVE за 2017–2022 гг.

Чтобы оценить скорости движения исследуемых ледников было использовано 198 снимков с группировки спутников Sentinel-1 с февраля 2017 по декабрь 2023 с интервалом между снимками 12 дней. Они были обработаны в ПО SNAP по алгоритму представленному на рисунке 1. Было получены 612 пар снимков и составлена 21 карта среднегодовых скоростей движения трёх ледников за 2017-2023 гг., а также 18 карт скоростей движения трёх ледников по данным ITS_LIVE за 2017-2022 гг.

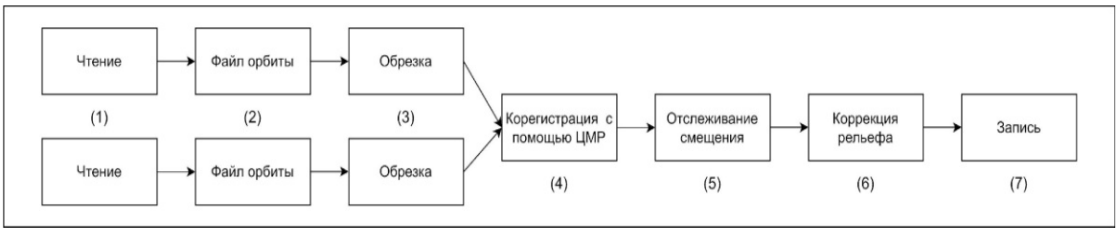


Рис. 1. Процесс обработки снимков в ПО SNAP для получения скоростей движения ледников, составлено автором.

В 2017–2018 гг. ствол ледника Валленберга двигался с СЗ на ЮВ (рис. 2), со скоростью >1,5 м/сут в 2017 и 0,6 м/сут в 2018. В 2017 г. на фронте образовалось поле повышенных скоростей (3-7 м/сут), снизившихся до 3 м/сут в 2018 г. В 2019–2023 гг. скорость не превышала 0,3 м/сут, что указывает на стагнацию. По ITS_LIVE, ствол ледника был смещён к левому борту, а в 2017 г. на фронте фиксировалась скорость >8 м/сут, но данные значения находились непосредственно на фронте ледника, и такая высокая скорость была связана с тем, что фиксировалась скорость движения айсбергов, которые откалывались от фронта ледника. Различия объясняются разным разрешением методов.

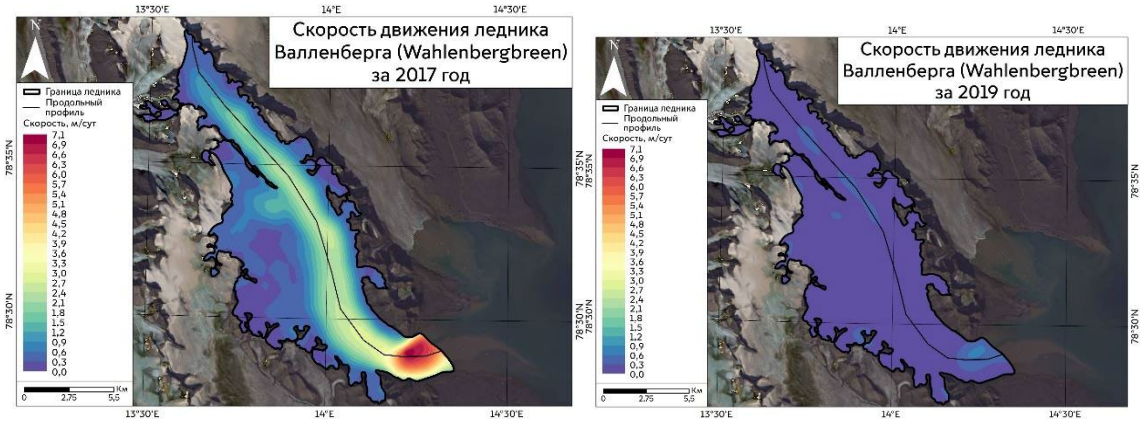


Рис. 2. Среднегодовая скорость движения ледника Валленберга за 2017 год (слева) и 2019 год (справа), составлено автором.

Ледник Круне имел область повышенных скоростей (более 1 м/сут), начиная с 35 км от истока до фронта (рис. 3). В прифронтовой зоне скорость составляла >1,5 м/сут (2017-2022), а в 2023 году – >3 м/сут. По данным ITS_LIVE, структура скоростей схожа, различия не превышают 0,3 м/сут, что согласуется с погрешностью измерений. Данные различия объясняются тем, что в базе данных ITS_LIVE используются оптические снимки, а в данной работе использовались радиолокационные снимки: в северной части ледника находится ледниковый купол Холтедальфонна, на котором оптические снимки скорость движения льда плохо фиксируется, а радиолокационные снимки скорость движения льда определяю с ошибками.

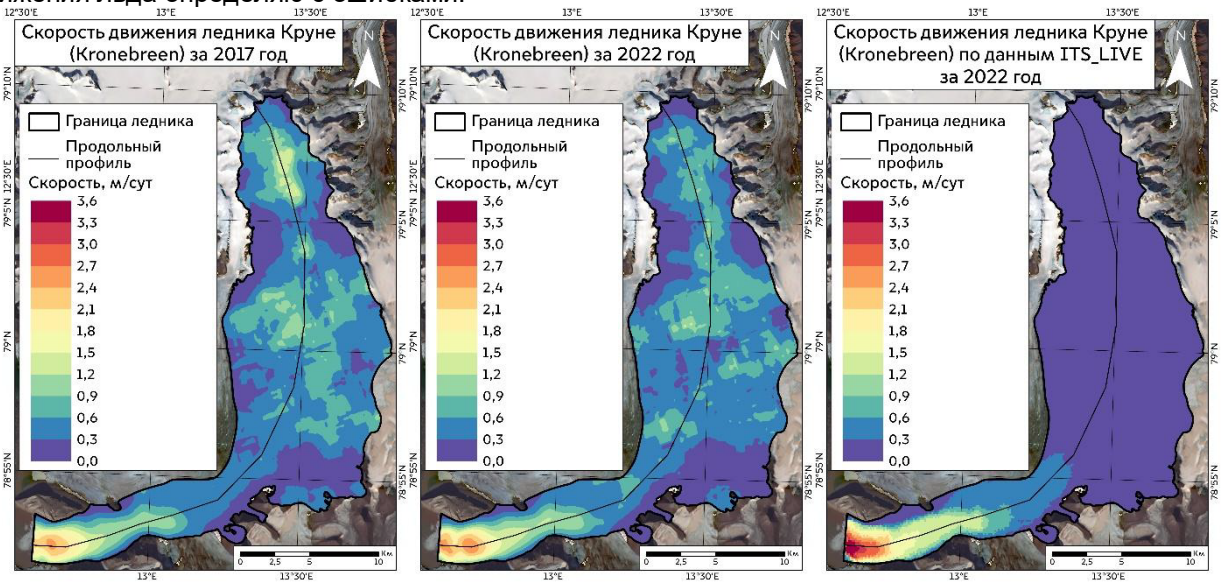


Рис. 3. Среднегодовая скорость движения ледника Круне за 2017 год (слева), 2022 год (в центре) и по данным ITS_LIVE за 2022 год (справа), составлено автором.

Ледник Монако двигался с Ю на С, с наибольшими скоростями в прифронтовой зоне. В 2017 году скорость достигала 2 м/сут, в 2018 – 3 м/сут, в 2019 – 4 м/сут, затем снижалась: 2020 – 2 м/сут, 2021-2023 – не более 1,5 м/сут (рис. 4). В 2019 году произошла подвижка ледника, а затем – стагнация. Пик скорости сместился с 1000 м от фронта (2017-2019) к самому фронту (2020-2023). Данные ITS_LIVE подтверждают выявленные тенденции.

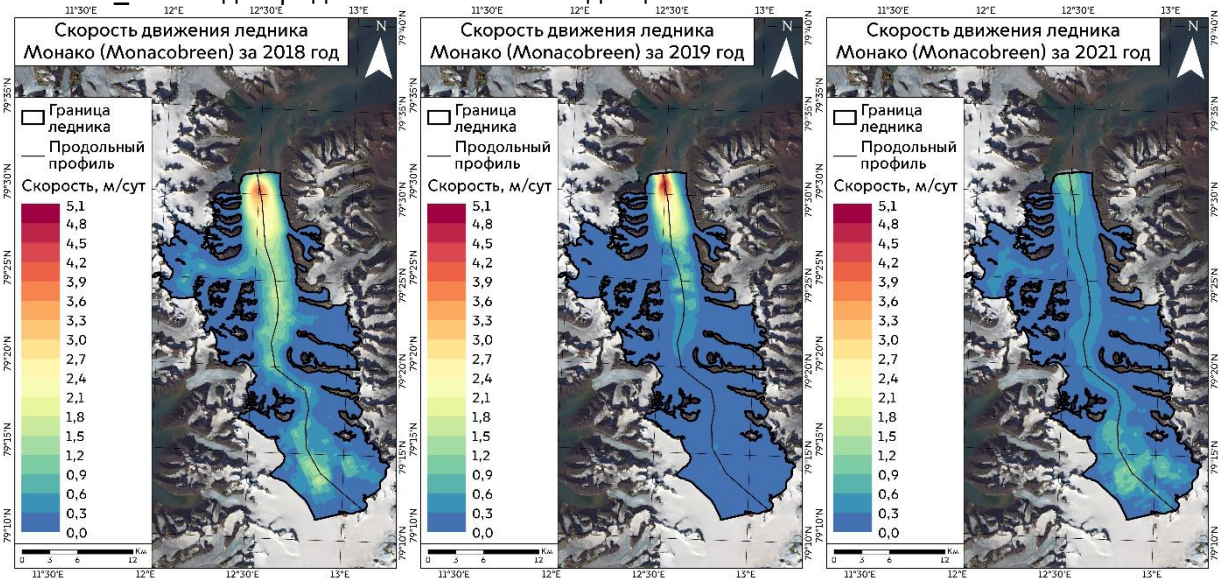


Рис. 4. Среднегодовая скорость движения ледника Монако за 2018 год (слева), 2019 год (в центре) и 2021 год (справа), составлено автором.

6. ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ, КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ДИНАМИКА МЕРЗЛЫХ ТОЛЩ

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ ЛИСТА Q-43 (НОВЫЙ УРЕНГОЙ)

Абрамов Д.А.[1], Дроздов Д.С.[1,2]
[1] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, РФ, Тюмень, Малыгина, 86
[2] Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ), 117997, РФ, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23
abramovda@my.msu.ru

В рамках государственного гидрогеологического и инженерно-геологического картирования севера Западной Сибири осуществляется подготовка пакета карт геокриологического содержания для листа Q-43 в масштабе 1 : 1 000 000 на основе дешифрирования космоснимков и анализе ранее опубликованных материалов. По характерным физиономическим признакам выделены природно-территориальные комплексы (геосистемы): ландшафтные подпровинции (природные зоны и подзоны), ландшафты (геоморфологические уровни) и местности (рис.1). Наполнение карты включает в себя наиболее полный комплекс геокриологических характеристик, таких как характер распространения многолетнемерзлых пород, среднегодовая температура, глубина сезонного оттаивания/промерзания, состав отложений, льдистость и др.

В пределах картируемой территории встречаются все типы площадного распространения ММП: сплошное, преимущественно сплошное, прерывистое, массивно-островное, островное и редкоостровное, закономерно сменяющие друг друга в широтном направлении с севера на юг. Отмечается также азональные изменения в характере распространения ММП, обусловленные особенностями конкретной территории.

Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ (тема № FWRZ-2021-0012)

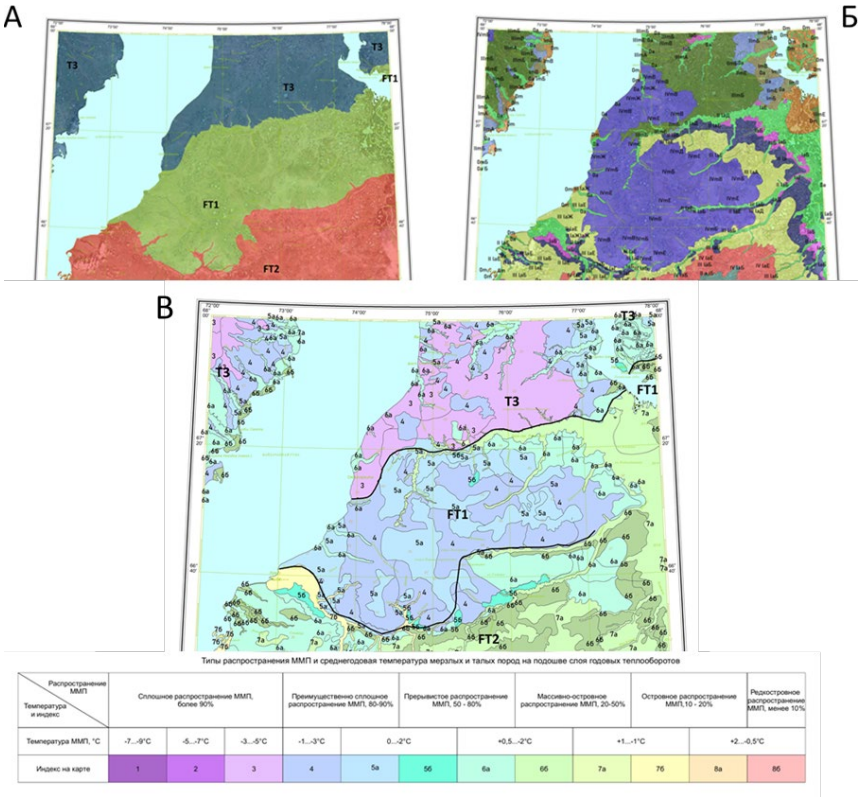


Рис. 1. Схема картирования фрагмента листа Q-43: А) Природных зоны; Б) Ландшафты и местности; В) Геокриологические условия.

АНАЛИЗ ДАННЫХ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ БЕРЕГОВ

Богатова Д.М.
НИЛ геоэкологии Севера, Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
aleksyutina@geogr.msu.ru

Изучение динамики арктических берегов становится особенно актуальным в условиях их активного освоения. Климатические изменения, наблюдаемые в этом регионе, существенно влияют на особенности мерзлотных процессов, делая прогнозирование береговой эволюции сложной задачей. Поведение береговой линии зависит от множества факторов, которые можно разделить на метеорологические и геокриологические. Эти две группы факторов тесно взаимосвязаны и могут оказывать влияние друг на друга как прямо, так и обратно пропорционально, причем их взаимодействие со временем изменяется. Именно из-за этой сложности современные методы анализа данных и машинного обучения представляют собой перспективный инструмент для прогнозирования динамики арктических берегов.

Исследование проводилось для нескольких участков Карского моря, сложенных мерзлыми дисперсными грунтами и имеющими практически сплошное распространение (за исключениями таликовых зон). На начальном этапе собиралась база данных о поведении береговой линии в разные годы, литологическом составе, геоморфологическом уровне и механизме разрушения берега в конкретной точке побережья. В ходе выполнения исследований мы пробовали применять различные методы анализа данных. На первом этапе проводилась статистическая обработка данных. Было выявлено, что распределение скорости отступания берега имеет тенденцию быть нормальным для более длительных периодов наблюдения (более 7 лет), тогда как для более коротких периодов наблюдается логнормальное распределение. Именно поэтому в дальнейшем анализировались темпы отступания берега за длительные периоды.

Темпы отступания являются численными параметрами, а литологический состав отложений, геоморфологический уровень и ведущий криогенный процесс – категориальными. Для анализа данных использовался корреляционный и факторный анализ. При изучении берегов большая часть данных представлена категориальными (не численными), поэтому мы переводили данные, используя «OneHotEncoder» из библиотеки «Scikitlearn». Корреляционный и факторный анализ был использован в модификациях, позволяющих совместно использовать категориальные и численные данные. Корреляция между категориальными и числовыми переменными была выполнена с использованием точечной бисериальной функции из библиотеки «scipy.stats». Коэффициенты корреляции между параметрами берега и величиной отступания слабые как положительные, так и отрицательные, но не достигают 0.6 по модулю ни с одной величиной (чаще 0.2-0.3). Высокие корреляции более 0.5 для Уральского берега у категориальных признаков, что логично, ввиду того, что уступы разной величины сложены разными грунтами, и на них преобладают различные криогенные процессы. Факторный анализ данных выполнялся «FactorAnalyzer» библиотеки «factor-analyzer» с вращением типа Promax. Подбор количества факторов показал наилучшие результаты, когда рассматривалось три фактора. Нагрузка отступания на фактор наблюдалась лишь для одного из них. Для Уральского берега берега для периода 2005-2012 и 2005-2017 нагрузка отступания на фактор была отмечена для двух факторов. При этом независимо от рассматриваемого периода максимальная нагрузка (0.91-0.98) отмечалась для зон развития термокарста, т.е. решающий вклад в отступание берега вносят участки развития термокарста. Впервые получены количественные доказательства данного процесса. Количественных доказательств того, что термоабразия играет вторую ведущую роль в отступании Уральского берега, факторный анализ не выявил. Термоабразии больше подвергаются лайдовые берега, сложенные преимущественно пестрым составом (при анализе фактора (2) и (3)), но даже имеющиеся положительные нагрузки с темпами отступания для данных за периоды 2005-2012 и 2005-2017 значительно ниже от 0.27 до 0.33 против фактора 1 (преобладающий процесс - термокарст), где нагрузки с отступанием 0.55-0.74. Что касается термоденудации, то ее ведущей роли факторный анализ также не выявил. Фактор (1) с лайдами, сложенными глинистыми грунтами, имеет высокие факторные нагрузки 0.63-0.71 (лайды) и 0.43-0.71(глинистые грунты). Глинистые грунты имеют большую естественную льдистость, ввиду которой больше подвержены осадке при оттаивании. Кроме того, на подводный береговой склон поступает меньше наносов ввиду большей льдистости при оттаивании и воздействия моря, а это также связано с глинистой и пылеватой фракциями в составе глинистых грунтов, которые не откладываются, а находятся в виде взвеси. Факторный анализ, примененный для массива данных Харасавэйского ключевого участка также показал, что основной вклад в отступание вносят участки, сложенные глинистыми грунтами. Таким образом, можно предложить следующий алгоритм определения участков с риском наибольшего отступания: провести факторный анализ для данных, содержащих

описательные (категориальные) и измеренные (численные) характеристики берегового массива, по результатам которого можно выявить признаки природной среды, вносящие наиболее существенный вклад в отступание берега.

Побережье Арктики всегда имеет сложную и неоднородную структуру, особенно при более внимательной оценке и увеличении масштаба наблюдений даже на относительно однородных участках побережья всегда можно обнаружить участки неоднородностей. Именно эти локальные особенности определяют окончательное положение береговой линии. Анализ пространственных данных о темпах отступания берега показал, что нелинейные во времени изменения скоростей отступания берега играют ключевую роль в изменении береговых линий на трех ключевых участках, при этом скорости отступания характеризуются в основном случайным характером. Предлагается следующий подход к определению отступание берега - отступание береговой линии может быть разложено на две части. Первая часть является случайной величиной и является результатом локальных вариаций строения берегового массива и, соответственно, первая часть может быть описана параметрами случайного распределения, такими, как среднее, дисперсия и стандартное отклонение. Вторая отражает систематическое перемещение средних величин случайных распределений, тогда как первая выступает в качестве доверительного интервала. Для выделения первой (случайной) составляющей было предложено использовать нейронную сеть. Использование нейронной сети при выделении шума является предпочтительнее простых фильтров сглаживания, таких как скользящее среднее или медианный фильтр, так как нейронная сеть позволяет улавливать тренды и патерны на сегментах ряда (в нашем случае на отдельных участках одного и того же берега). Мы использовали обратную сверточную сеть, которую используют обычно для выделения шума в изображениях или временных рядах. Для проведения вычислений нейронная сеть была реализована с помощью функций Conv1D и Conv1DTranspose библиотеки Keras. Обучение модели проводилось с помощью оптимизатора Adam и использованием среднеквадратичной ошибки (MSE). В результате работы программы исходный сигнал разделяется на близкий к нормальному распределению шум и полезный сигнал.

Работы выполнена по ГосЗаданию лаборатории геоэкологии Севера и при поддержке фонда «Интеллект»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПОВ ОТСТУПАНИЯ БЕРЕГА НА РАЗЛИЧНЫХ КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКАХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Богатова Д. М.[1], Баранская А. В.[1], Шабанов П.А.[1,2], Маслаков А. А.[1], Огородов С.А.[1]
[1] НИЛ геоэкологии Севера, Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
[2] Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
aleksyutina@geogr.msu.ru

Береговая зона арктических морей является крайне динамичной из-за наличия многолетнемерзлых дисперсных пород, состояние и устойчивость которых зависят от температурного режима. Климатические изменения наиболее заметны в арктическом регионе. В последние десятилетия наблюдается тенденция к увеличению скорости разрушения берегов, что связано с потеплением, усиливающим термическое и ветро-волновое воздействие. На темпы отступания берега влияет множество факторов – от климатических и геологических до антропогенных. Взаимодействие мерзлых уступов с воздухом и морской воды с положительными температурами, а также чередование ведущих факторов в течение сезона значительно усложняют моделирование берегового отступания. В настоящее время существует множество моделей, моделирующих динамику арктического побережья, однако большинство из них являются региональными и ориентированы на конкретные участки береговой линии. Основными береговым деструктивными процессами в Арктике являются термоабразия и термоденудация. В начале теплого периода, когда море еще покрыто льдом, преобладает термоденудация. Осенью доминирует термоабразия. Для более точного моделирования необходимо учитывать воздействие волн на берег и режим выноса талого материала.

Для исследований было выбрано несколько участков на арктическом побережье: Варандей (Печорское море), о.Белый, уральский берег Байдарацкой губы (Карское море), о.Муостах (море Лаптевых), п.Лорино (Берингово море). Расчеты проводилось в программе QFrost, использующую двухслойную явную разностную схема с применением метода балансов и с энтальпийной формулировкой Стефана. Для получения математической модели, характеризующей соответствующие природные условия для каждого участка, в программе первоначально решалась обратная задача (калибровка модели). Время стабилизации температурного поля отложений составляло 100 лет. Использовались литературные данные по температуре грунтов. При моделировании были приняты климатические характеристики по данным метеостанций. Во время калибровки математической модели задавалось осредненное за 30 летний период (1990-2020 гг) значение среднемесячной температуры воздуха и значения коэффициентов теплообмена в теплый и холодный период года. Расчеты проводились для трех климатических сценариев. Удаление оттаявшего материала проводилось с различной периодичность, но учитывался период динамически-активного периода. Упрощенная схема отступания бровки обрыва, представлена на Рис. 1. Для западного сектора Российской Арктики характерен метелевый перенос и неравномерное накопление снега в тыловом шве морских террас. С началом теплого периода оттаивание пород начинается в верхней части склона, поскольку нижняя часть остается под снежником. Льдистые отложения оттаивают быстрее, чем почвенно-растительный слой, ввиду большей теплопроводности, что ведет к формированию ниши и нависанию над ней слоя дернины (Рис.1). Впоследствии при достижении предельно-напряженного состояния слой дерна отрывается, сползая вниз по склону. В результате обнажаются мерзлые льдистые породы (Рис. 1-3, 1-3а). Подобный процесс происходит несколько раз в течение теплого сезона, и формируется «гофрированный» склон (Рис. 1-4). В правой части Рис. 1 представлен снимок микротеррасированного склона, сформированного при таком механизме.

Термоденудационные процессы постепенно ослабевают, если талый материал не удаляется со склона. В расчетах учитывалась разная частота ветра, способного генерировать волны, переносящие материал от основания берегового обрыва. Рассматривались следующие сценарии: единичный вынос в конце теплого сезона, ежемесячный (3-4 раза в зависимости от температуры), еженедельный (10-13 раз) и каждые два дня (33-40 раз). Воздействие морской среды, связанное с удалением оттаявшего материала, начиналось с наступлением динамически активного периода. В зависимости от исследуемого региона безледный сезон варьируется от середины июня (район Варандея) до середины–конца июля (остров Муостах).

Моделирование показало хорошее соответствие с наблюдениями. В расчетах при прочих равных условиях песчаные берега разрушаются значительно быстрее, чем участки, сложенные глинистыми породами, однако такое не всегда наблюдается на выбранных участках. Вероятнее всего это связано с тем, что в естественных условиях при поступлении большого количества песчаного материала происходит избыточное накопление наносов, в то время, когда в модели это никак не

ограничивает вынос. Ключевым фактором, определяющим скорость берегового отступания, является характер удаления талого материала со склона.

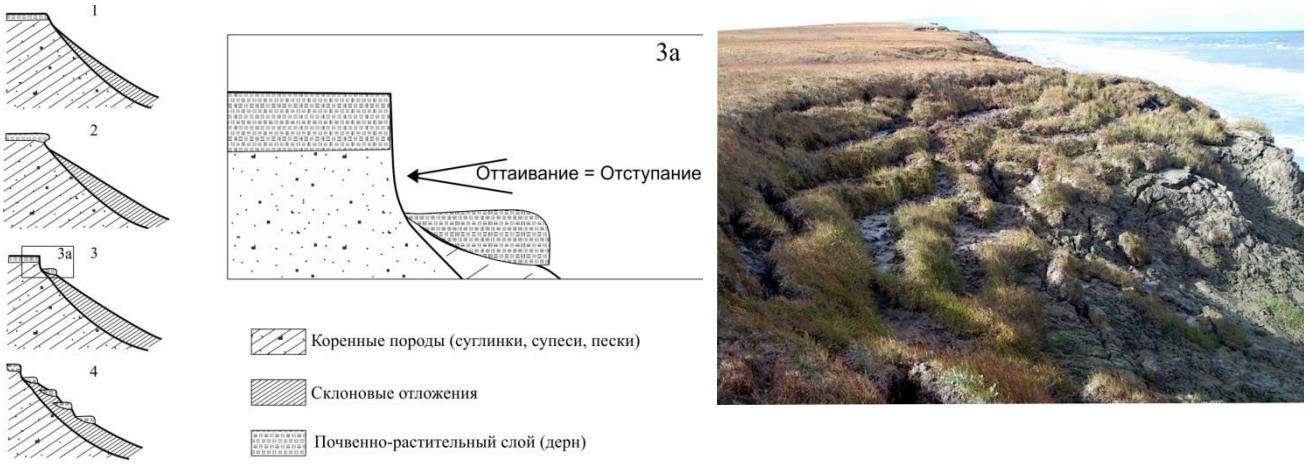


Рис. 1 Схема отступания бровки обрыва

Разработанная модель учитывает ветровую и волновую активность без сложных расчетов, но опирается на режим выноса талого материала. Ее результаты хорошо совпадают с фактическими темпами разрушения берегов на ключевых участках. Однако выявленные закономерности пространственного изменения скорости берегового отступания не всегда могут быть полностью объяснены только в рамках данной модели.

Работа выполнена при поддержке РНФ проект №22-77-10031 «Берега морей Российской Арктики: прошлое, настоящее, будущее».

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР УЧАСТКОВ С РАЗВИТИЕМ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ

Бондарь В.В, Викторов А.С.
Институт Геоэкологии РАН, Москва
valter_bond@mail.ru

Полигонально-жильные льды широко распространены в пределах криолитозоны. И природные комплексы, сформировавшиеся по трещинам, и полигоны сети являются основными элементами морфологической структуры подобных участков. Изучением механизма формирования и развития сетей занимались многие авторы, при этом внимание уделялось также морфометрическому анализу и закономерностям сети (Lousada, 2020; Kessler et al. 2003), однако, в целом, вероятностные закономерности строения сетей изучены недостаточно. Целью исследования являлось определение вероятностных закономерностей морфологических структур участков с развитием полигонально-жильных льдов.

Исследование посвящено закономерностям неортогональных сетей, в которых нет преобладающих направлений. Было выбрано пять ключевых участков, находящихся в разных физико-географических условиях, но имеющих морфологическую однородность (рис. 1). Участки расположены в хасыреях и долинах рек.

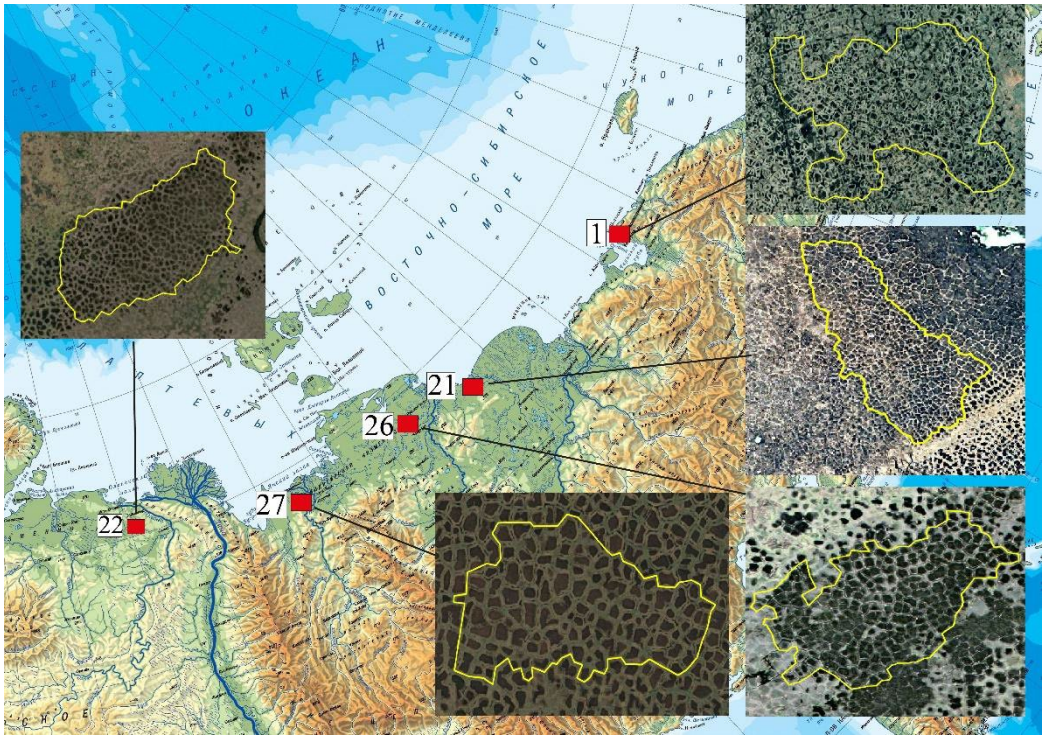


Рис. 1. Расположение участков исследования и примеры изображения на материалах космической съемки высокого разрешения

По космическим снимкам высокого разрешения (WV-2, WV-3, 1.2 м/пикс) в программе QGIS на каждом участке были оцифрованы основные элементы сети: отрезки, узлы соединений, полигоны, посчитаны длины и углы ориентировки отрезков. Затем полученные выборки в программе Statistica сопоставлялись с различными теоретическими функциями распределения для оценки согласия теоретического и эмпирического распределения по критерию Пирсона. Выборки сопоставлялись с равномерным, нормальным, логнормальным, экспоненциальным распределениями и гамма-распределением. Число центров полигонов и узлов сети на случайно выбранной площадке сопоставлялись с распределением Пуассона.

Результаты исследования выявили следующие статистические закономерности, которые выполнялись на каждом из пяти участков при объемах выборок от 400 до 1478:

распределения длин отрезков соответствуют гамма-распределениям,

распределения площадей полигонов соответствуют логнормальным распределениям,

распределения углов ориентировки отрезков сети соответствуют равномерным распределениям (на четырех участках из пяти) (рис. 2).

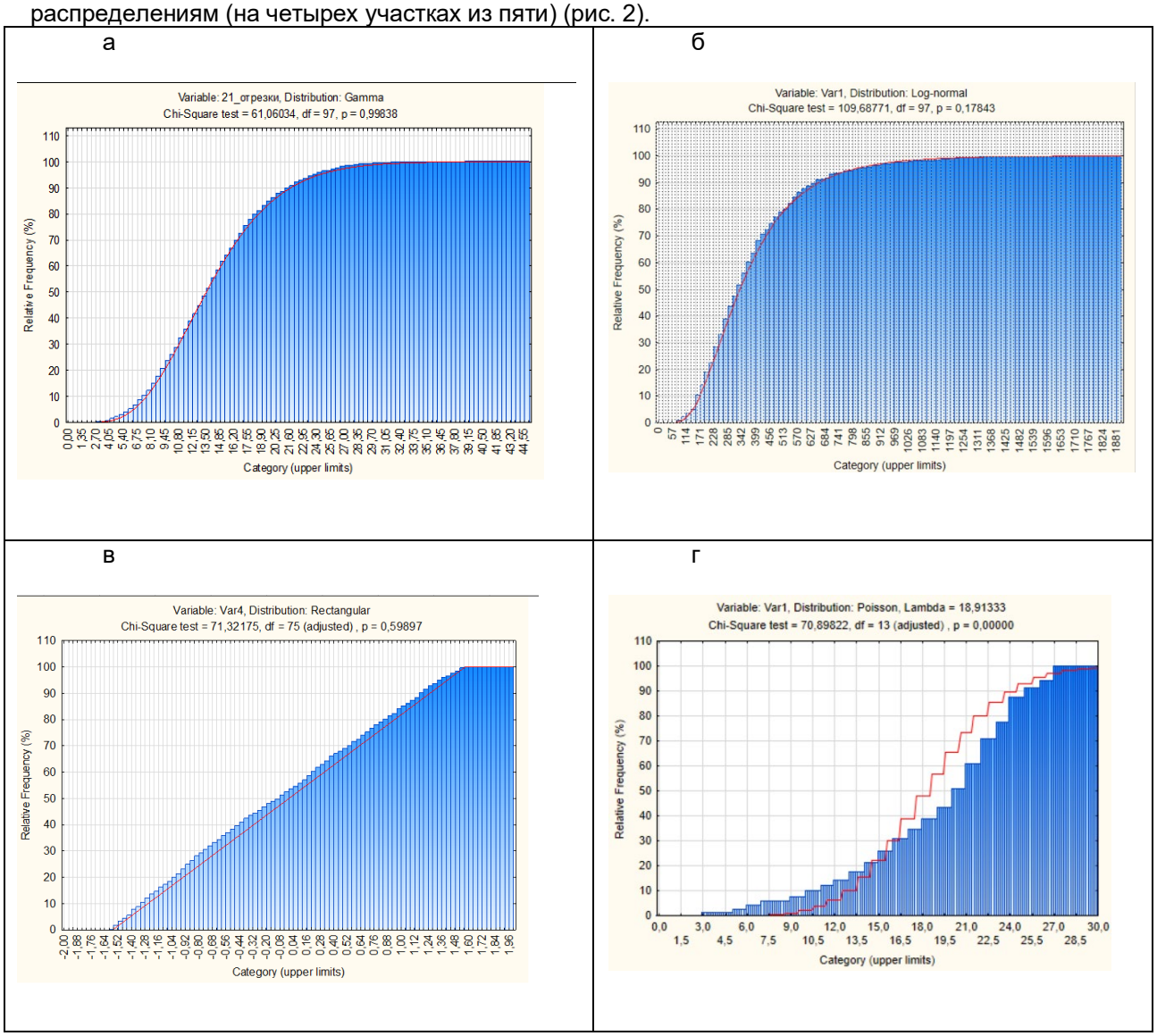


Рис. 2. Пример степени соответствия теоретических и эмпирических распределений для 21 участка: а) длины отрезков (гамма-распределение), б) площади полигонов (логнормальное распределение), в) углы отрезков (равномерное распределение), г) число центров полигонов на случайно выбранной площадке (распределение Пуассона); синий контур – эмпирическое распределение, красная линия – теоретическое распределение.

Хотя вид распределений оставался постоянным, значения параметров распределений варьировали от участка к участку в связи с изменениями состава отложений и геокриологических условий. Анализ выборок числа узлов сетки и центров полигонов на случайно выбранной площадке показал, что распределения статистически значимо отличаются от распределения Пуассона.

Kessler, M. A., & Werner, B. T. Self-organization of sorted patterned ground. Science, 2003. 299(5605), 380-383.

Lousada, M. F. da S. *Ice-Wedge Polygonal Patterns: Morphometric Analysis and Environmental Control Factors (Adventdalen, Svalbard)* [Doctoral dissertation, University of Lisbon, Instituto Superior Técnico]. 2020

ЦИФРОВАЯ КАРТА СУБАКВАЛЬНОЙ МЕРЗЛОТЫ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ

Васильев А. А., **Облогов Г.Е., Широков Р.С.**
Институт криосферы Земли Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень
al.a.vasiliev@gmail.com

Исследование субаквальных многолетнемерзлых пород (СММП) представляет интерес в связи с обнаружением перспективных месторождений нефти и газа на шельфе Российской Арктики и развития Северного морского пути. Другой важной проблемой, связанной с СММП, является оценка роли мерзлоты в формировании потоков метана на шельфе арктических морей в целом влияния изменений климата на природную среду Арктики.

Многолетнемерзлые породы на шельфе формируются и сохраняются в результате промерзания отложений во время регрессий и последующей трансгрессии и относятся преимущественно к реликтовой мерзлоте, Некоторые исследователи предполагают возможность новообразования мерзлоты на шельфе, но фактические наблюдения этого не подтверждают.

Распространению и эволюции субаквальной мерзлоты в Арктике посвящено множество публикаций, однако подавляющее большинство из них опираются на ограниченные данные реальных наблюдений.

Прямые наблюдения за условиями залегания, мощностью, состоянием и температурным режимом субаквальной вечной мерзлоты чрезвычайно ограничены. К настоящему времени в Баренцевом и Карском морях пробурены всего 17 скважин, вскрывших СММП. При этом большинство скважин расположены в прибрежной мелководной акватории морей. Одновременно с этим все большее развитие получают геофизические методы изучения СММП, среди которых набольшую перспективу имеют высокоразрешающие сейсмические методы. Сейсмоакустическое профилирование стало почти обязательным видом работ при проведении морских экспедиций. К настоящему времени в акваториях Баренцева и Карского морей накоплен значительный объем сейсмоакустических профилей. Современное развитие аппаратной, программной и методической базы позволяет использовать результаты интерпретации сейсмических данных, как самостоятельный источник геологической информации. идентификация СММП в сейсмическом разрезе основывается на выделении высокоамплитудных отражений - сейсмоакустических маркеров, обладающих отчетливыми постседиментационными характеристиками. Обычно кровля СММП сопоставляется в сейсмическом разрезе с ярким сейсмическим отражением прямой полярности, которое возникает за счет скачкообразного увеличения скорости распространения звуковой волны в толще мерзлых пород. Наличие в разрезе даже небольших содержаний свободного газа приводит к формированию в волновом поле разнообразных помех: ярких пятен и обширных зон потери корреляции.

Заверка данных сейсмоакустического профилирования и бурения на шельфе на примере бурового профиля в районе Харасовея и в море Лаптевых показала хорошую сходимость. В результате интерпретации более 100 тыс пог км сейсмоакустических профилей установлены участки уверенного прослеживания сейсмоакустических маркеров СММП, а также области предполагаемого их развития. Наиболее уверенно сейсмоакустические маркеры СММП фиксируются в широкой прибрежной полосе южной части Карского моря и западной части Ямальского шельфа. Менее уверенно подобные маркеры зафиксированы в пределах локальных поднятий центральной и северо-восточной частей шельфа. Для Баренцева моря хорошие результаты поиска СММП были получены к югу от о-ва Колгуев.

По данным бурения и сейсмоакустики кровля СММП залегает на глубине 5-60 м ниже поверхности морского дна. Статистическая обработка данных показала, что встречаемость глубин залегания кровли СММП близка к нормальному закону распределения, при этом максимум встречаемости в 47% приходится на глубину залегания кровли СММП 10-20 м от поверхности дна.

Таким образом использование данных бурения и сейсмоакустики позволило впервые создать базу данных и построить карту фактического распространения и глубины залегания кровли СММП Баренцева и Карского морей. База данных содержит более 26 тыс. записей о проявлении и глубине залегания СММП. Карта построена в ГИС-формате, в качестве координатной системы ГИС-проекта была выбрана WGS 84/North Pole LAEA Russia, которая наиболее удобна для картографического представления СММП Российской Арктики. Впрочем, созданные карты легко перевести в любую другую проекцию. Также одним из преимуществ работы в QGIS является использование базовых карт в качестве подложки. Для интерполяции данных использована сплайн-аппроксимация. Облик карты приведен на рис. 1.

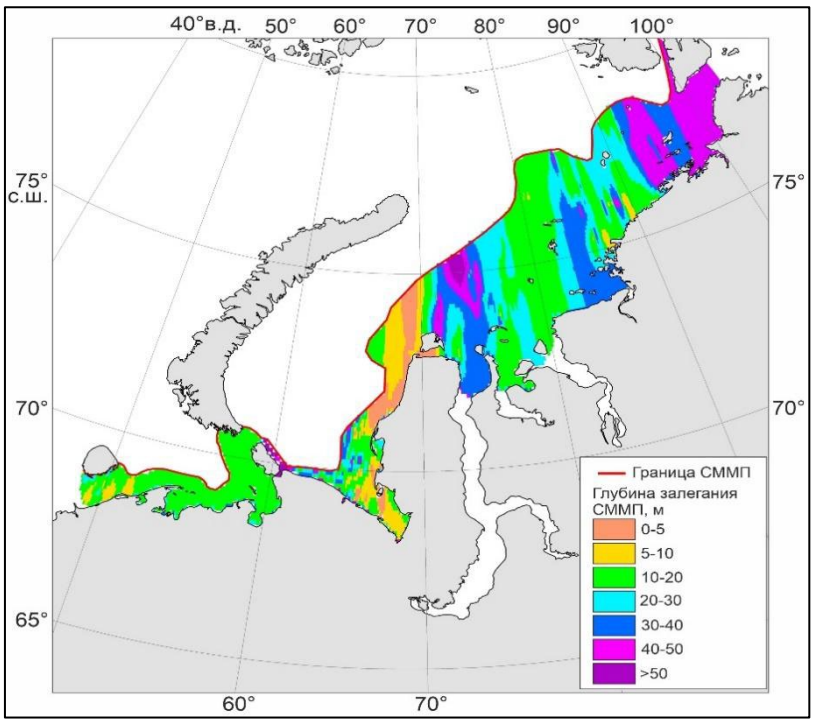


Рис. 1. Облик карты распространения и глубины залегания кровли СММП.

Разработанная карта легко актуализируется по мере поступления новых данных о проявлении и глубине залегания СММП. Добавление новых записей в базе данных автоматически перестраивает (уточняет) содержание карты.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0005).

РАЗВИТИЕ ПОЛИГОНАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА В ЗОНЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ «ТОРФЯНИК-ОЗЕРО» НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: ЛОКАЛЬНЫЙ И РЕГИОНАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

Данько М.М.[1], Хомутов А.В.[1], Хайруллин Р.Р.[2]
[1]*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия*
[2]*b.geos GmbH, Корнойбург, Австрия*
mdanko1996@mail.ru

Мониторинг состояния многолетнемерзлых пород, включающий наблюдения за изменениями глубины их сезонного протаивания и температуры, проводится с конца XX века и имеет широкое географическое распространение. Увеличение суммы среднесуточных положительных температур воздуха и среднегодовой температуры воздуха приводит к резкой активизации криогенных процессов на севере Западной Сибири, в том числе и на полигональных торфяниках. В связи с тем, что в настоящее время работы по изучению динамики рельефа в зоне взаимодействия «торфяник-озеро» в контексте современного развития многолетнемерзлых полигональных торфяников на южном пределе их распространения в Западной Сибири отсутствуют, актуальна оценка изменений, происходящих в приозерной части таких торфяников в результате проявления экзогенных процессов на фоне современных климатических колебаний.

Работа состоит из двух аспектов: локального и регионального. Локальный включает изучение и мониторинг полигональных торфяников в зоне взаимодействия «торфяник-озеро» на ключевых участках в северной части Пур-Тазовского междуречья. Региональный включает дистанционный анализ распространения полигональных торфяников и прогноз развития опасных криогенных процессов на полигональных торфяниках в северо-восточной части Западной Сибири (Хомутов и др., 2023) с особым вниманием к оценке приозерных торфяников.

Локальный уровень. С 2021 г. в северной части Пур-Тазовского междуречья от устья реки Таз на севере до долины реки Нуны-Яха на юге проводится мониторинг за развитием полигонального рельефа и верхней части многолетнемерзлых пород на полигональных торфяниках по берегам озер. В 2021-2022 гг. было заложено 7 площадок мониторинга на полигональных торфяниках с торфами разной мощности, приуроченных к хасыреям на разных геоморфологических уровнях (Данько, Хомутов, 2024).

Выделено несколько климатических и ландшафтных факторов, влияющих на полигональные торфяники в зоне взаимодействия «торфяник-озеро»: волновое воздействие озер на берега, сложенные торфяными отложениями, распределение снежного покрова и характер растительного покрова. Результаты обработки накопленных с 2021 г. данных мониторинга в сочетании с результатами проводящегося с 2016 г. мониторинга ключевых торфяников района исследований позволили сделать предварительный вывод об общей зависимости деградации полигональных торфяников по берегам озер. На фоне современных климатических изменений волновое воздействие озерной воды, напрямую зависящее от розы ветров района исследований, является основным фактором активизации термоэрозионных и термоабразионных процессов, в свою очередь являющихся причиной деградации полигонального рельефа по берегам озер. При этом влияние характера распределения снежного и растительного покровов дифференцируется как ландшафтно-геоморфологическими условиями, в которых располагаются площадки мониторинга, так и изменениями этих условий внутри каждой площадки.

Региональный уровень. Первые результаты изучения изменений полигональных торфяников в зоне взаимодействия «торфяник-озеро» позволили в совокупности с материалами беспилотной съемки ключевых торфяников и высокодетальными космическими снимками определить подходы к разработке критериев устойчивости полигональных торфяников и прогноза развития опасных криогенных процессов на них в зоне взаимодействия «торфяник-озеро» с учетом современных климатических изменений и антропогенного воздействия.

Основой для апробации предлагаемой методики является карта распространения полигональных торфяников для северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья (Хомутов и др., 2022).

Работа выполняется Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

Данько М.М., Хомутов А.В. Развитие полигонального рельефа в зоне взаимодействия «торфяник-озеро» на севере Пур-Тазовского междуречья // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Выпуск 11, С. 507-511.

Хомутов А.В., Бабкин Е.М., Бабкина Е.А., Данько М.М., Хайруллин Р.Р., Королева Е.С. Полигональные торфяники на северо-востоке Западной Сибири при антропогенном воздействии на фоне изменений климата // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: материалы всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М.И. Сумгина, г. Якутск, Россия, 2023. С. 230-232.

Хомутов А.В., Королева Е.С., Данько М.М., Хайруллин Р.Р. Полигональные торфяники севера Западной Сибири: распространение и вопросы классификации // Сборник докладов 6-й конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне». МГУ имени М.В. Ломоносова. Под ред. Р.Г. Мотенко. - М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. С. 745-751.

РАЗРАБОТКА ГИС-ПАКЕТА КАРТ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В МАСШТАБЕ 1:1 000 000

Дроздов Д.С.[1,2], Малкова Г.В.[1], Коростелев Ю.В.[1], Бердников Н.М.[1]
[1] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, РФ, Тюмень, Малыгина, 86
[2] Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ), 117997, РФ, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23
ds_drozdov@mail.ru; galina_malk@mail.ru

В составе полистного государственного гидрогеологического и инженерно-геологического картирования начато новое геокриологическое ГИС-картирование территории севера Западной Сибири. Оно осуществляется на единой контурной основе, образованной при дешифрировании космоснимков, анализе ранее составлявшихся карт и формировании компьютерного слоя природно-территориальных комплексов (ПТК). Контуры ПТК типизированы. Для каждого типа с использованием геосистемного подхода обобщена геокриологическая информация по полному комплексу соответствующих параметров. Обобщение основано на имеющихся архивных и современных геокриологических данных, а также на анализе влияния компонентов природной обстановки на формирование мерзлотных условий с учетом широтных закономерностей и локальных особенностей.

1. Проведена ландшафтная типизация и выделение ПТК разного ранга на базе топоосновы масштаба 1:1 000 000 и космоснимков высокого разрешения для листов Q-42, Q-43, R-42(43). Карта ПТК послужила контурной основой всех тематических геокриологических, прогнозных и оценочных карт.
2. Составлена многослойная карта поверхностных отложений, включающая возраст, литологию, засоленность и оторфованность пород.
3. Разработан комплект тематических карт геокриологического содержания (распространение, температура, мощность, льдистость ММП, развитие криопэгов, криогенных процессов).
4. Разработана прогнозная карта среднегодовой температуры ММП на 2050 год, учитывающая реакцию криогенных ландшафтов на климатическое потепление (по среднему сценарию RCP 4.5 на базе ансамбля глобальных климатических моделей), зональность криолитозоны и замедление тренда повышения температуры ММП, по мере ее приближения к нулевым значениям.
5. С использованием таблиц СНиП 2.02.04-88 получены региональные оценки прочностные характеристик мерзлых грунтов в зависимости от их температуры, литологии, засоленности, оторфованности и разработаны оценочные карты расчетных сопротивлений ММП сдвигу по поверхности смерзания R_{af} для двух временных срезов – на 2020 и 2050 гг.

Назначением ГИС-пакета геокриологического содержания является полная характеристика геокриологических условий приповерхностной 10-20-метровой толщи грунтов, а также обобщённая оценка толщи мерзлоты на всю её мощность. Основной фактический материал – это результаты предыдущих съёмочных и картировочных работ. В части состояния и температуры грунтов данные актуализированный на основе по фонового геокриологического мониторинга (в том числе собственного).

На рис. 1. показаны фрагменты тематических слоев различного содержания геокриологической карты для территории центрального Ямала.

Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ (тема № FWRZ-2021-0012

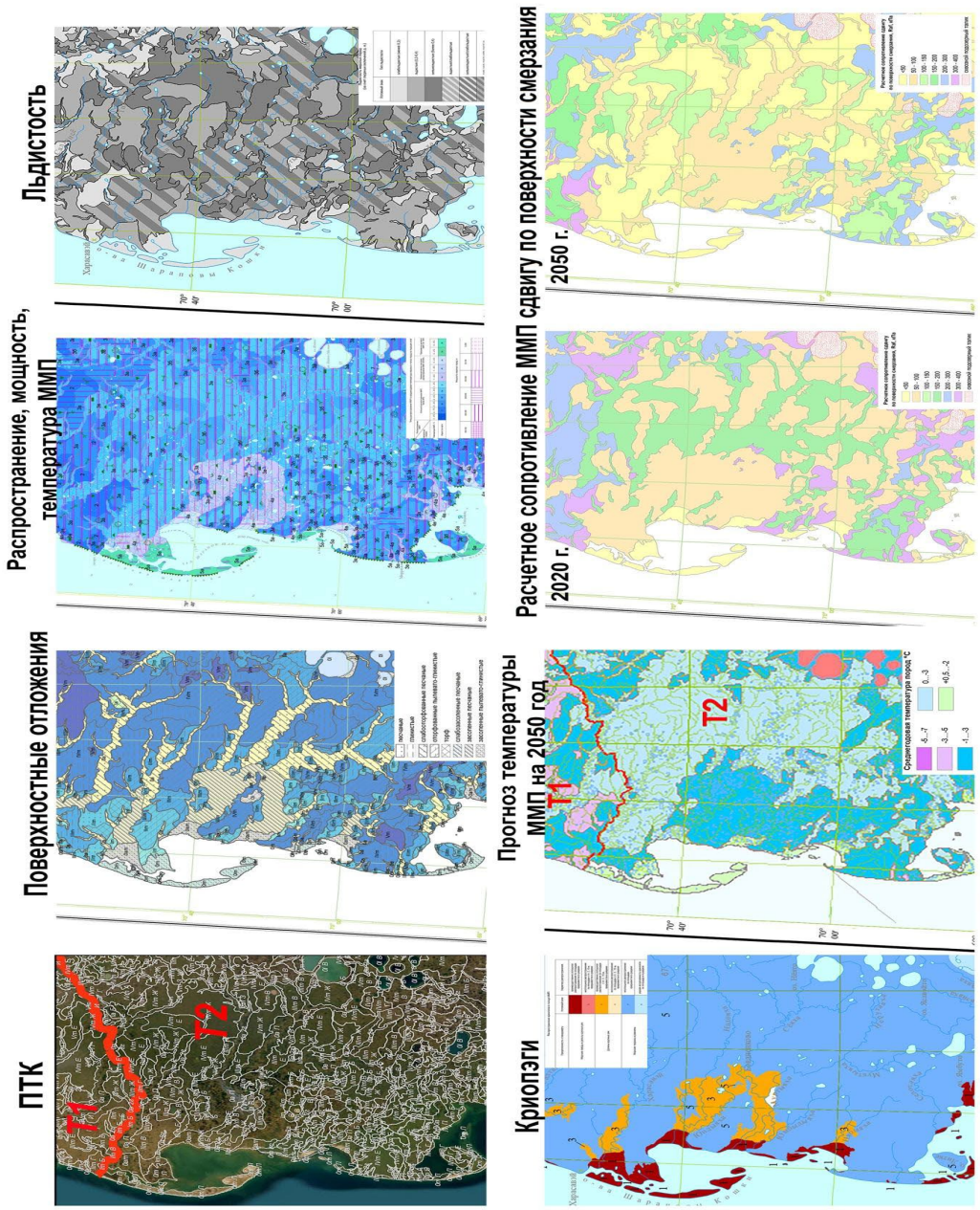


Рис. 1. Макеты тематических слоев геокриологической карты масштаба 1:1 000 000 (фрагмент для центральной части полуострова Ямал

ОЦЕНКА ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА И КОЛИЧЕСТВА ТВЕРДЫХ ОСАДКОВ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA5-LAND ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Жунусова О.Р.[1,2], Землянскова А.А.[1,3], Макарьева О.М.[1,2,3], Шихов А.Н.[1,4]
[1] Санкт-Петербургский государственный университет
[2]Государственный гидрологический институт
[3] Северо-Восточный государственный университет
[4] Пермский государственный национальный исследовательский университет
zhun.oksana@gmail.com

Высота снежного покрова является ключевой характеристикой климатического режима. Эти параметры оказывают значительное влияние на термический режим многолетнемерзлых пород и гидрологический режим. В горных регионах распространения многолетнемерзлых пород, таких как Магаданская область, наблюдается недостаток наземных наблюдений, в особенности за характеристиками снежного покрова. В связи с этим, становится актуальным использование данных реанализа, таких как ERA5-Land, данные которого находятся в открытом доступе [1].

Цель данного исследования – оценить воспроизводимость высоты снежного покрова и количества твердых осадков по данным реанализа ERA5-Land на территории Магаданской области.

Для региона исследования подготовлены данные суточных значений высоты снежного покрова и количества твердых осадков ERA5-Land на основе 3-часовых и часовых данных соответственно. Пространственное разрешение ERA5-Land – 0.1°×0.1°.

Для оценки качества реанализа использовались наблюденные суточные данные о высоте снежного покрова и твердых осадков с 21 метеостанций Магаданской области, расположенных на абсолютных высотах от 9 до 850 м за период 2010–2024 гг. Дополнительно использовались данные, полученные с 12 фотоловушек, установленных авторами в Магаданской области для наблюдения за высотой снежного покрова на термометрических скважинах за период с сентября 2022 г. по декабрь 2024 г., их описание приведено в [2]. Они обеспечивают информацию о высоте снега на б**о**льшем, чем метеостанции, диапазоне высот – от 175 до 1182 м.

Для сопоставления с наблюдениями были выбраны ближайшие узлы сетки ERA5-Land. В качестве критериев сравнения использовались характеристики смещения (bias), среднеквадратичной ошибки (RMSE), средней относительной ошибки и коэффициента корреляции Спирмена.

Анализ показал, что данные ERA5-Land систематически завышают высоту снежного покрова в Магаданской области. Среднее смещение высоты снежного покрова по данным ERA5-Land составляет +26 см относительно наблюдений на метеостанциях. Такая переоценка значений высоты снежного покрова частично может быть вызвана завышением количества твердых осадков по данным реанализа (в среднем на 37%). Смещение значений количества твердых осадков не зависит от высоты местности. Для значений смещений высоты снежного покрова наблюдается зависимость от высоты расположения станции: с ростом высоты станции увеличивается переоценка реанализом высоты снежного покрова. Однако для станций выше 600 м эта зависимость имеет обратный характер.

Наибольшие ошибки, наблюдаются в горных районах и для станций, расположенных на берегу Охотского моря (рис. 1), как для значений высоты снежного покрова, так и для количества твердых осадков. Это может быть связано с особенностями рельефа и микроклимата, влияющими на процессы перераспределения снега.

ERA5-Land систематически показывает более длительный период существования снежного покрова, чем фактические наблюдения. Однако стоит принять во внимание, что при анализе использовались данные о высоте снега, полученные по рейке, а не в ходе снегомерных наблюдений. В таких данных присутствует недооценка высоты снежного покрова в результате выдувания снега у рейки.

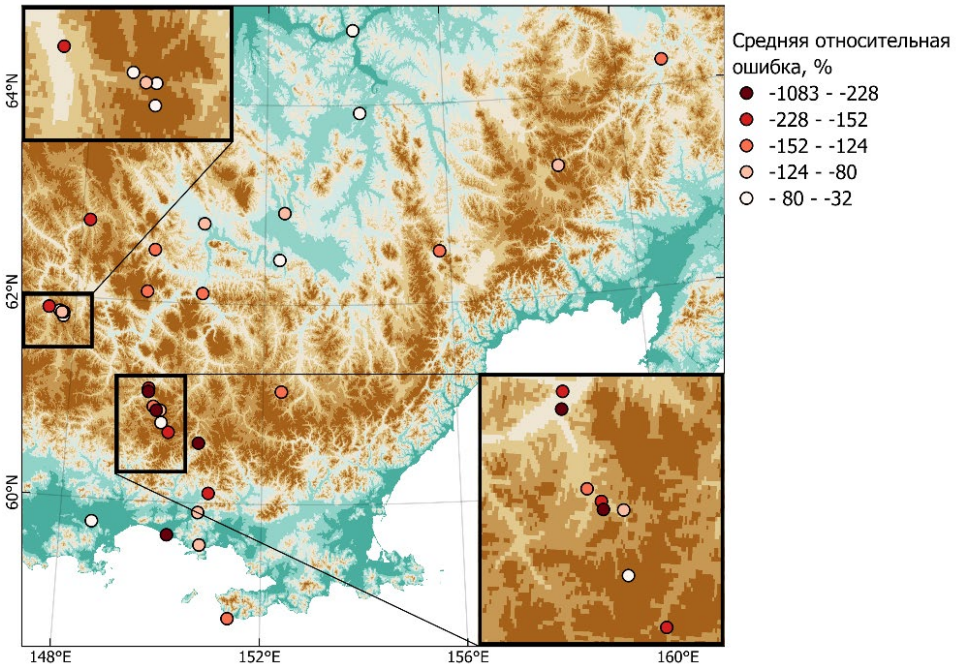


Рис. 1. Распределение средней относительной ошибки по территории Магаданской области.

Несмотря на систематическое завышение высоты снежного покрова для большинства станций (пример на рис. 2а), высота снежного покрова удовлетворительно воспроизводится на некоторых станциях (пример на рис. 2б).

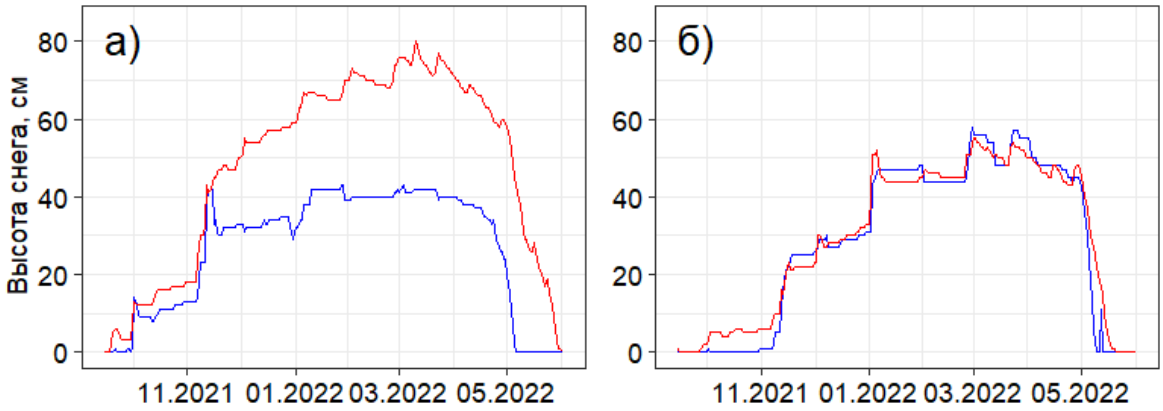


Рис. 2. Сравнение наблюденной высоты снега с высотой снега по данным ERA5-Land для станций Сусуман (а) и Коркодон (б).

Результаты исследования способствуют более точному пониманию возможностей и ограничений использования данных реанализа ERA5-Land для оценки снежного покрова в условиях криолитозоны Северо-Востока России. Выявленные недостатки необходимо учитывать при использовании данных ERA5-Land в геокриологических, климатических и гидрологических исследованиях.

Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта «Разработка методики оперативного прогноза опасных гидрометеорологических явлений в условиях Дальневосточного федерального округа (на примере Магаданской области)».

1. Climate Data Store // URL: https://cds.climate.copernicus.eu/ (дата обращения: 15.03.2025)

2. Землянскова А. А. и др. Динамика снежного покрова на территории Магаданской Области //Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. – 2024. – №. 11. – С. 539-545.

К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ТОРФЯНИКОВ НА ПУР-ТАЗОВСКОМ МЕЖДУРЕЧЬЕ

Задорожная Н.А., Хомутов А.В., Слагода Е.А.
Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень
ZNataly95@yandex.ru

В настоящее время большое внимание исследователей уделяется изучению торфяников в районе многолетнемерзлых пород (ММП), так как они являются источником палеогеографической информации. В последние годы множество залежей торфа подверглись протаиванию на большую глубину за счет изменений климата, поэтому их изучение актуально. В результате полевых работ, проводимых на исследовательских полигонах Пур-Тазовского междуречья в 2021 году, удалось получить новые данные о формировании торфяников и полигонально-жильных льдов (ПЖЛ).

В экспедиции на одном из торфяников в хасырее в 5 км к западу от с. Газ-Сале в северной части Пур-Тазовского междуречья пробурена скважина, изучено обнажение торфа с полигонально-жильным льдом на берегу озера, отобраны образцы на радиоуглеродное датирование и влажность. Результаты радиоуглеродного датирования образцов были получены в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН с применением жидко-сцинтилляционного метода, калибровка радиоуглеродных дат выполнена в программе Calib 8.2 по калибровочной кривой IntCal20, калиброванные даты представлены как медианные значения возраста (календарных лет – кал. л.). Влажность образцов определена весовым методом в полевых условиях.

Детальные описания отложений в береговом обнажении и скважине, а также результаты радиоуглеродного датирования показали, что некоторые слои торфа в береговом уступе термокарстового озера были подвержены переотложению и перемешиванию, в результате чего была нарушена геохронологическая последовательность горизонтов в верхней части разреза. Причинами могли быть просадка и уплотнение торфа при протаивании в деятельном слое, уменьшение его льдистости и поверхностный смыв талыми и дождевыми водами.

Формирование торфяных залежей происходило с разной скоростью, но вся толща торфа мощностью 5,2 м, вскрытая в скважине, была образована в голоцене (самая древняя датировка по ^{14}C соответствует 8800±90 лет, медианное значение калиброванного возраста составляет 9849 лет). В разрезе скважины заметно сильное изменение льдистости.

В интервале 0,3-1 м влажность мерзлого торфа постепенно увеличивается с 517% на границе с СТС до 1374% в нижней части слоя. Определение ^{14}C-возраста торфа с глубины 1 м показало 4900±70 лет (5641 кал. л.), что указывает не столько на медленную скорость образования органического вещества, сколько на отсутствие накопления или сильное уплотнение (за счет снижения льдистости) верхней пачки отложений. Глубже 1 м увеличивается толщина ледяных шлиров, резко повышается льдистость отложений, составляя 1524 - 3014% в промежутке с 1 м до 3,5 м (максимальная влажность 5331% достигается на глубине 2,68 м). Датировка по ^{14}C на отметке 3,5 м имеет возраст 7320±80 (8124 кал. л.). В интервале 3,5-5,2 м льдистость торфа снова понижается (с 1167% в верхней части слоя до 564% в нижней).

В среднем скорость роста торфяника до наступления голоценового оптимума (примерно соответствует глубинам от 1 до 5,2 м) составляла приблизительно 1 м за 1000 лет (примерно 1 мм в год). Следовательно, по данным скважины толща торфа с глубины 1 м до 5,2 м накопилась примерно за 4 тысячи лет в довольно холодных условиях ранней половины голоценого периода. Большая мощность полигональных торфяников связана именно с их высокой льдистостью за счет текстурных и полигонально-жильных льдов, что указывает на быстрый темп накопления осадков и переход их в мерзлое состояние.

Вскрывающаяся в обнажении берегового уступа термокарстового озера видимая часть ПЖЛ высотой 3 м по своей морфологии и строению является сингенетической. Глубину ее проникновения вероятнее всего удалось определить по скважине, где крупные шлиры льда (толщиной несколько сантиметров) встречались вплоть до глубины 5,85 м в слое суглинка, подстилающего торф. Соответственно, время начала образования жилы было ранее 8800±90 лет назад (9849 кал. лет назад).

Определить время окончания формирования жильного льда не представляется возможным, так как верхняя часть жилы вытаяла, но можно предположить, что рост жилы прекратился во время голоценового оптимума ~4-5 тыс. лет назад (Архипов, Волкова, 1994). Полученный возраст отложений над ледяной жилой свидетельствует о перемешивании, просадках, пучении и криотурбациях над

кровлей жилы из-за колебаний глубины СТС, так как над ПЖЛ наблюдается неравномерное захоронение разновозрастного более молодого материала.

В нижней части вскрытого торфа были обнаружены фрагменты древесины, которые соответствуют примерно 8,5 тыс. лет. Следовательно, в этот период происходил рост деревьев, который может быть признаком более теплых летних периодов, чем в настоящее время, но в то же время и более суровых зимних сезонов, благоприятных для роста ПЖЛ, как ранее было отмечено в публикации (Васильчук, Васильчук, 2016). То есть в тот период были более континентальные условия, чем современные, в связи с регрессиями Северного Ледовитого океана в периоды похолоданий.

Исходя из результатов радиоуглеродного датирования образцов из верхней части берегового уступа и пробуренной неподалеку скважины, сложно определить палеогеографическую обстановку во второй половине голоцена на исследуемом участке, так как скорее всего верхние несколько метров отложений были размыты и переотложены. Остается только предполагать, что в периоды потепления климата мощность накопленных слоев торфа была меньше за счет низкой льдистости пород.

Благодаря проведенным исследованиям в районе Пур-Тазовского междуречья были получены новые данные о скорости и особенностях формирования торфяников в озерно-болотных условиях.

Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № (FWRZ-2021-0012).

Архипов С.А., Волкова В.С. Геологическая история, ландшафты и климаты плейстоцена Западной Сибири / РАН, Сиб. отд-ние, Объед. ин-т геологии, геофизики и минералогии [Отв. ред. чл.-кор. РАН А.В.Каныгин]. – Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1994. – 105 с.

Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Мощные полигональные торфяники в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири // Криосфера Земли, 2016. – т. XX, № 4. – С. 3-15.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ ДЕФОРМАЦИИ МЕРЗЛЫХ ТОЛЩ

Курчатова А.Н.[1,2], **Рогов В.В.**[1,3]
[1] *Институт криосферы Земли, ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень*
[2] *АО «Мессояханефтегаз», г. Тюмень*
[3] *МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва*
kurchatova.an@tmn.gazprom-neft.ru

Основным условием развития деформаций мерзлых толщ является температура горных пород. Упругие или хрупкие деформации развиваются в горных породах при низких температурах с формированием трещин, например, системы полигонально-жильных льдов. Пластические деформации возникают, напротив, при повышении температуры грунтов до температуры фазовых переходов при протаивании и/или последующем промерзании, что приводит к активизации термокарста, конвективных и солифлюкционных процессов, криогенного оползания, формированию таберальных структур. Третья группа деформаций обусловлена давлением флюидов, наиболее ярким примером являются инъекции воды в условиях промерзания водонасыщенных горизонтов в закрытой системе, с формированием бугров пучения, а также дислоцированных пластовых залежей льда.

Ряд исследователей интерпретирует дислокации пластовых льдов на севере Западной Сибири с позиции ледникового генезиса. К гляциальным деформациям в разрезах береговых обнажений морских террас они относят складки пород и льда, интерпретируемые как следы движения и напора ледника. Так, несогласный контакт пластового льда с перекрывающими отложениями принимается в качестве неоспоримого доказательства погребенного происхождения залежей.

Противоречивость представлений о происхождении деформаций в мерзлых толщах Западной Сибири основаны во многом на фрагментарной доступности разрезов для детального изучения морфологии и соотношения подземных льдов с вмещающими породами.

Деформации мерзлых толщ изучены авторами на примере структурных форм рельефа, керна мерзлотно-параметрических скважин глубиной до 100 м, в том числе пробуренных на озерно-аллювиальных равнинах южной части полуостровов Тазовский и Гыданский, в береговых разрезах и термоцирках обнажений пластовых льдов на морских террасах полуострова Ямал – в районах м. Марре-Сале (Западный Ямал) и НГКМ Бованенково (Центральный Ямал). Специфика деформации геологической среды обуславливает формирование разномасштабных взаимосвязанных структур в единой геодинамической обстановке в рамках структурного парагенеза.

Анализ строения массивных льдов и криогенных текстур в зонах дислокаций показывает изменчивость вязкопластического течения в зависимости от температуры, нагрузки и примесей, что обусловлено физическими свойствами льда. Разномасштабная система пликативных и дизъюнктивных деформаций в мерзлых толщах представляет структурные парагенезы сдвига. Пластическое течение массивного льда под действием нагрузки вышележащих отложений, плотность которых вдвое превышает плотность льда, приводит к формированию крупнокристаллической структуры. Напротив, в условиях сжатия при формировании складок происходит двойникование кристаллов и их дробление по линиям сколов. Максимальное уменьшение размера кристаллов и их удлинение происходит на участках развития кливажа при формировании вертикальных штоков. Дополнительными признаками деформации является будинаж грунтовых прослоев и газовых включений на участках растяжения, формирование сложных пликативных складок и катаклаз минеральных зерен в узких полосах включений кливажных зон. В зависимости от P-T условий последовательно реализуются следующие виды деформаций: хрупкое разрушение – прерывистое скольжение – пластическое течение (Рис. 1).

Выполненные исследования разномасштабных криогенный структур показали возможность развития деформаций в мерзлых толщах без их оттаивания.

Установленные геодинамические обстановки развития деформаций мерзлых толщ исключают покровное оледенение Западной Сибири в неоплейстоцене.

Работа выполнена в Институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0005).

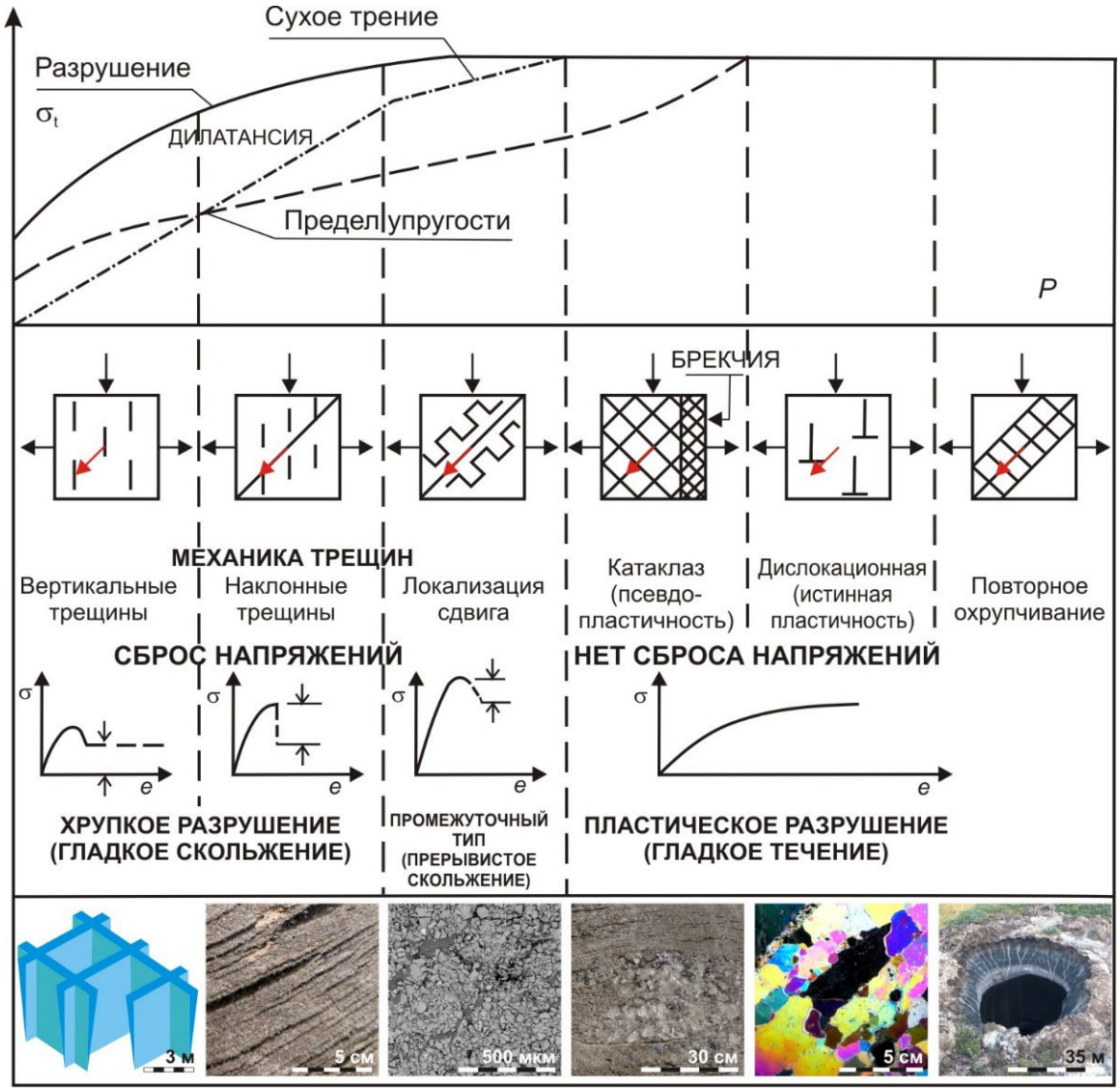


Рис. 1. Деформации мерзлых толщ по модели сплошной среды

ОЦЕНОЧНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ МЕРЗЛОТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛАНДШАФТОВ ПУР-ТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Мариняк С.В.[1], Зотова Л.И.[1], Викулина М.А.[1]
[1] Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, Москва
sofiya.marinyak@mail.ru

Мерзлотная устойчивость – это способность северных ландшафтов противостоять активизации опасных экзогенных процессов, возникающих в результате хозяйственной деятельности, которые приводят к необратимому ухудшению экологической обстановки и деформациям зданий и сооружений. Актуальность данного исследования заключается в необходимости прогнозной оценки техногенной активизации криогенных процессов при любых инженерно-географических исследованиях на стадии проектирования.

Территория Пур-Тазовского междуречья является репрезентативной для зон южной тундры и северной лесотундры и расположена в двух геокриологических областях, что обуславливает неоднородные мерзлотные условия: характер распространения ММП сменяется от сплошного до прерывистого, среднегодовые температуры пород изменяются от -5°С до положительных значений, близких к 0°С. Ландшафтный облик представлен южнотундровыми и лесотундровыми зональными ландшафтами, которые формируются на морских террасах средне- и позднеплейстоценового возраста и озерно-аллювиальных равнинах.

Картографические средства изображения наглядно показывают дифференциацию территории на северную и южную часть, где северная часть имеет более низкие абсолютные отметки, менее дренирована, для нее наиболее характерны термокарстовые процессы. Южная часть более высокая и дренированная, термокарст менее распространен, характерны послепожарные сукцессии.

На основе дешифрирования космических снимков, анализа литературных источников, фондовых и полевых материалов был создан кадастр природных комплексов в форме табличной легенды, построенной по зонально-генетическому принципу. Вертикальные колонки соответствуют родам ландшафта с геолого-геоморфологическими характеристиками, а строки – почвенно-растительным ассоциациям, сгруппированным по типу увлажнения. Пересечения колонок и строк соответствуют видам ландшафтов ранга урочищ и типов местности. В итоге на территории выделено 52 вида ландшафтов, сгруппированных по четырем типам увлажнения, 9 типам местности и 20 типам почвенно-растительных сообществ. На основе ландшафтно-типологической карты создавалась оценочная Карта потенциальной устойчивости ландшафтов к проявлению криогенных процессов масштаба 1:500 000.

Оценка устойчивости к активизации негативных процессов проводилась на основе расчета интегрального индекса - коэффициента мерзлотной устойчивости КМУ по пяти оценочным факторам: объемная льдистость отложений, среднегодовая температура и литологический состав пород, снижение защитных свойств напочвенного и торфяного покровов при механических нарушениях, скорость самовосстановления растительности после нарушений. Влияние каждого фактора на устойчивость оценивалось по 4-м баллам: 1 балл присваивался в случае слабого влияния, 4 балла – сильное влияние фактора на активизацию опасных экзогенных процессов. Для учета значимости факторов в общей оценке, экспертным путем были определены весовые коэффициенты для каждого из них. По каждому из 52 видов ландшафтов были набраны характеристики и рассчитан интегральный индекс устойчивости для проведения ранжирования по четырем градациям мерзлотной устойчивости: от устойчивых (КМУ ≤ 0,4) – с наиболее низкой вероятностью возникновения опасных процессов до неустойчивых (КМУ ≥ 0,63) – с максимальной вероятностью возникновения техногенных процессов при нарушениях механического характера.

Установлено, что наибольшее влияние на потенциальную активизацию процессов оказывают: сильнольдистые (>0,4) подстилающие породы – торф и оторфованные суглинки; высокотемпературные (-1,0º…+0,5ºС) мерзлые породы; максимальные теплоизоляционные свойства торфяно-моховых покровов; длительное или неполное самовосстановление растительного покрова.

На итоговой оценочной карте отображено ранжирование ландшафтов тестового участка по степени потенциальной мерзлотной устойчивости. Красным цветом выделены неустойчивые ландшафты, зеленым – наиболее устойчивые.

ГИС-анализ этой карты показал, что 38,7% северной части Пур-Тазовского междуречья занято мерзлотно-неустойчивыми ландшафтами, которые имеют тенденцию к активизации опасных экзогенных процессов (термокарста, пучения, термоэрозии), а также заболачивания при техногенных нарушениях механического характера. Эти ландшафты с основном представлены торфяниками,

комплексными болотами, комплексами слабодренированных тундр и плоскобугристых болот и вторичной растительностью на месте пирогенных тундр и лесов. Группа устойчивых ландшафтов к проявлению опасных процессов занимают всего 15,4%. Это кустарниково-мохово-лишайниковые тундры возвышенных и дренированных водоразделов, а также залесенные поймы и дельты рек Пур и Таз, в которых в естественном состоянии проявляется дефляция на прирусловых отмелях, локальное заболачивание, в дельтах – локальное пучение. Доминирующей является группа слабоустойчивых ландшафтов – 45,9%. Здесь наиболее характерны тундровые и редколесные сообщества междуречий разной степени дренированности, и лугово-кустарниковые пойменные сообщества. Из экзогенных рельефообразующих процессов распространены заболачивание, сезонное пучение, морозобойное растрескивание, локальная дефляция и термоэрозия.

Для предотвращения деформации инженерных сооружений и деградации ландшафтов под воздействием опасных экзогенных процессов, при промышленно-хозяйственном освоении территорий необходимо проведение различных природоохранных мероприятий – запретительных, мелиоративных, рекультивационных, инженерных, ресурсосберегающих.

Работа выполнена при поддержке НИР «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (ГЗ) №121051100164-0.

КЛАССИФИКАЦИЯ НАЛЕДНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮЖНОЙ ЯКУТИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНДЕКСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Николаева Е.С.[1,2], Гагарин Л.А.[1]
[1]Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
[2] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
nikolaeva_lizaveta@mail.ru

Формирование наледей представляет собой сложный и многокомпонентный процесс, обусловленный динамикой подземных вод, морфологическими особенностями рельефа, климатическими условиями и геокриологическими характеристиками природной среды. Использование картографических методов индикации наледных ландшафтов способствует структурированию и обобщению данных с учетом природных региональных особенностей. Развитие современных исследовательских технологий, в частности использование многоспектральных спутниковых снимков, открывает новые перспективы в области дешифрирования объектов криолитозоны (Klinge et. al., 2021).

В 1980-х годах А.В. Гаврилов впервые применил мультиспектральные космические изображения для дешифрирования наледных ландшафтов Южной Якутии (Гаврилов, 1981). Исследования показали, что различные типы водоносных таликов маркируются в ландшафте определенным набором растительных сообществ. Основной целью настоящей работы является определение генетического типа наледеобразующих подземных вод и вмещающих их водоносных таликов территории Чульманского низкогорья в Южной Якутии.

В рамках исследования использовались снимки Sentinel-2 (2018–2023 гг.), загруженные с геопортала Copernicus, с уровнем облачности менее 15%. Основным инструментом анализа выступал нормализованный разностный индекс растительности (NDVI), наряду с которым применялись модифицированные индексы SAVI и ARVI для минимизации влияния атмосферных и почвенных факторов.

Анализ данных проводился с использованием геоинформационной системы ArcGIS Pro 3.1.0, в которой осуществлялась неконтролируемая классификация индексных изображений. Для исключения природораздельных склонов и водоразделов, не входящих в рамки нашего исследования, применялась буферная зона речной сети шириной 250 м. В результате анализа выделены четыре основных типа участков: светлохвойные и темнохвойные леса, травяная растительность, а также территории без растительного покрова.

Дополнительную информацию о потенциальных условиях произрастания лесной и травянистой растительности на выделяемых формах рельефа обеспечили морфометрические индексы расчлененности рельефа (TRI), топографического положения (TPI) и влажности водосборов (TWI), рассчитанные на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 30 м в программной среде GIS SAGA. Диапазон значений NDVI в период активной вегетации составил 0,38–0,80, а вероятность точной идентификации лесных формаций по индексам превышала 0,8. Верификация полученных результатов осуществлялась путем соотнесения с натурными наблюдениями и аэрофотосъемкой.

По результатам анализа получены индексные растровые изображения, на которых отображены участки лесной растительности с NDVI более 0,52.

Наиболее информативными для выявления лесных формаций оказались снимки, выполненные в августе, в период максимальной вегетации. Дополнительно мультиспектральные снимки февраля и марта позволили определить породный состав древесной растительности.

В классификации наледей по А.В. Гаврилову выделено четыре типа ландшафтов (табл. 1), коррелирующих с рельефом, растительностью и водоносными таликами.

Таблица 1. Классификация наледных участков Чульманского низкогорья по А.В. Гаврилову (Гаврилов, 1981)

Участок	Общий вид	Водоносные талики	Количество наледей
А	Глыбово-щебенчатые (НПТ)	гидрогеогенные сквозные напорно-фильтрационные	20
	Травяно-моховые (НПТ)		42
	Глыбово-щебенчатые (склоны)		9
	Травяно-моховые (склоны)		10
Б	Галечные	сквозные подрусловые и пойменные напорно-фильтрационные, ниже которых грунтово-фильтрационный талик	22
	Ерниково-моховые		29
	Безлесные участки		14
В	Безлесные участки	сквозные подрусловые и пойменные грунтово- и напорно-фильтрационные	25
	С растительностью		22
	Ерниково-моховые		16
Г	Еловые леса	сквозные подрусловые и пойменные грунтово- и напорно-фильтрационные	18
	Смешанные леса		10

Участки типа А (35%) представляют собой днища речных долин с травяно-моховым растительным сообществом, в пределах которых развиты напорно-фильтрационные талики. Ландшафты типа Б (27%) характеризуются оголенными, сложенными галечником, поверхностями днищ речных долин с залегающими под ними подрусловыми таликами. Участки типов В и Г (38%) включают днища речных долин, покрытые ельниками и смешанными лесами, под которыми существуют грунтово-фильтрационные и напорно-фильтрационные талики.

Несмотря на условность методов дистанционного зондирования, их применение позволяет выявить основные закономерности формирования и пространственного распределения наледей на территории Чульманского низкогорья.

Гаврилов А. В. Классификация наледных участков южной части криолитозоны в целях изучения наледей аэро-и космическими методами. Вестник Московского университета. Серия 4 Геология. 1981. Т. 1. С. 73-85.

Klinge M., Schneider F., Dulamsuren C., Arndt K., Bayarsaikhan U., Sauer D. Interrelations between relief, vegetation, disturbances, and permafrost in the forest-steppe of central Mongolia //Earth Surface Processes and Landforms. 2021. V. 46. №. 9. P. 1766-1782.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕГРАДАЦИИ И АГРАДАЦИИ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ФОНЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ТРЕНДА.

Ривкин Ф.М.[1], Булдович С.Н.[2]
[1] ИКЗ ТюмНЦ СО РАН, Тюмень,
f-rivkin@narod.ru
[2] МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва,
ser_bul@rambler.ru

Новообразование мёрзлых грунтов на фоне положительного тренда температуры воздуха, является частью механизма естественной динамики ММП и механизма их самоконсервации (Иванова и др, 2011; Seppälä et al, 2011; Sjöberg et al, 2015; Осадчая, 2016; Ривкин и др, 2017; Ривкин, Булдович 2024). Этот процесс оказывает существенное влияние как на закономерности изменения ландшафтов, так и комплекс парагенетических процессов. В частности, значительные по площади несквозные талики и участки с заглублённой кровлей ММП, расположенные в широких и плоских межблочных понижениях, долинах стока, дренированных озёрных котловинах и других ландшафтах, подвержены локальному промерзанию. В верхней части разреза на таких участках формируются локализованные маломощные мёрзлые толщи. В плане они обычно составляют минерально-торфяные бугры с размерами в плане до 3х3м. В центре бугров мощность мёрзлых грунтов достигает 3 – 3,5м. При этом такие образования иногда могут занимать до 90% площади ландшафта, что соответствует прерывистому с поверхности распространению мёрзлых грунтов. При этом кровля ММП располагаться на таких участках, как правило, существенно глубже глубины годовых теплооборотов. Таким образом формируется парадоксальная геокриологическая ситуация, а именно: участок характеризуется прерывистым с поверхности распространением ММП (до 90% распространения по площади), а на глубине ниже 3 – 3,5м участок сложен талыми грунтами. Кровля ММП может располагаться иногда ниже глубины 10-12м. Если при мелко- и среднемасштабном картографировании геокриологических условий в их описании только указывается возможность наличие таких участков, то при крупномасштабном картировании (1:5000 и крупнее) такие уже должны выделяться в самостоятельные геокриологические районы.

Закономерности этого явления, несмотря на понятный, в целом, механизм новообразования ММП представляется, тем не менее, достаточно неоднозначными. Так или иначе процесс дифференцированной аградации ММП на фоне положительного температурного тренда связан с локальной неоднородностью поверхности: наличием или возникновением неровностей (небольших бугров или кочек) на изначально ровной поверхности гидроморфных участков.

Возникновение криогенного микрорельефа, на изначально ровных и плоских участках обычно связывают с неравномерным по площади многолетним морозным пучением. При этом более интенсивное пучение на локальных участках может провоцироваться плановыми (площадными) неоднородностями поверхностных и грунтовых условий. Но более значимой в количественном отношении причиной возникновения неровностей рельефа может являться неравномерная осадка поверхности, реализующаяся при оттаивании сверху (деградации) многолетнемерзлых пород. В настоящее время указанный процесс в условиях наблюдаемых климатических изменений имеет широкое развитие на южной периферии криолитозоны.

В целях установления закономерностей данного явления нами рассматриваются несколько вариантов новообразования ММП на фоне положительного температурного тренда:

- Первое - новообразование ММП (пучение) за счёт благоприятного сочетания внутри сезонных факторов: температуры воздуха; режима снегонакопления; грунтовых условий в пределах слоя сезонного промерзания и оттаивания (с учётом дренирования торфа и при неизменном снежном покрове)..
- Второе - новообразование ММП на фоне дифференцированного понижения кровли ММП и появления неровностей рельефа на изначально ровных гидроморфных поверхностях (из-за пространственной дифференцированности льдистости в пределах слоя многолетнего оттаивания) и с учётом влияния дренированности торфа и изменений условий снегонакопления.

Проведённые исследования показали, что локальное новообразование ММП так или иначе связано с формированием на изначально плоской поверхности неровностей. Появление первичных бугорков может быть обусловлено как дифференцированностью пучения по площади, так и неравномерной осадкой поверхности, реализующаяся при оттаивании сверху (деградации) многолетнемерзлых пород. Первое реализуется как результат сезонного пучения и может трансформироваться в многолетнее промерзание при благоприятном сочетании поверхностных и грунтовых условий. Второе реализуется как закономерный результат многолетней и дифференцированной по площади осадки грунтов в результате деградации ММП.

Общий для обоих вариантов является то, что на изначально ровной поверхности формируются локальные возвышенные участки, на которых изменяются условия теплообмена пород с внешней средой (изменяются условия снегонакопления) и свойства грунтов (из-за дренирования торфа и грунтов в верхней части разреза). Всё это вызывает понижении температуры пород в диапазоне, достаточном для многолетнего промерзания грунтов и новообразования ММП. Более того, можно сказать, что сам этот тренд и сопутствующая ему деградация ММП являются причиной указанного новообразования.

Работа выполнена институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема: “Изучение формирования, структуры, изменчивости и прогнозирование состояния криосферы, в том числе многолетнемерзлых толщ и криогенных ландшафтов”, №(FWRZ-2021-0012).

Иванова Н.В., Кузнецова И.Л., Пармузин И.С. и др. Геокриологические условия Шведской Лапландии // Материалы Четвертой конф. геокриологов России (Москва, 7–9 июня 2011 г.). М., Изд-во Моск. ун-та, 2011, т. 1, с. 77–82.

Осадчая Г.Г. Мерзлотно-ландшафтная дифференциация Большеземельской тундры: современное состояние и использование при освоении: Автореф. дис. д-ра геогр. наук. Москва, 2016, 50 с.

Ривкин Ф.М., Булдович С.Н. Закономерности новообразования мерзлых пород на фоне положительного климатического тренда // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 1, с. 15–22. DOI: 10.15372/KZ20240102. EDN: BRODEN.

Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармузин И.С. Закономерности изменения геокриологических условий в результате осадки мерзлых грунтов при оттаивании // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 26–34.

Seppälä M. Synthesis of studies of palsa formation underlining the importance of local environmental and physical character-istics // Quat. Res., 2011, vol. 75, p. 366–370. DOI: 10.1016/ j.yqres. 2010.09.007.

Sjöberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W**.** Geophy-sical mapping of palsa peatland permafrost // The Cryosphere, 2015, vol. 9, p. 465–478. DOI: 10.5194/tc-9-465-2015. – www.the-cryosphere.net/9/465/2015/

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ БУГРИСТЫХ БОЛОТ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА (МУРМАНСКАЯ ОБЛ.) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Рязанцев П.А.[1,2], **Крутских Н.В.**[2]
[1] *Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, Петрозаводск*
[2] *Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск*
chthonian@yandex.ru

На территории Фенноскандии, к которой относится и Кольский полуостров, многолетнемерзлые породы и сопутствующие термокарстовые ландшафты спорадические, и относятся к водно-болотным угодьям [1]. Однако, обследования состояния мерзлоты для данной территории проводятся крайне редко [2]. Ранее считалось, что южная граница распространения зоны бугристых болот на Кольском полуострове совпадет с южной границей криолитозоны примерно на широте 67°50′N. Однако в реальности отдельные бугристые болота могу распространятся гораздо южнее вследствие особенностей локальных природных условий. Современные модели криолитозоны северного полушария описывают территорию Кольского полуострова только по эпизодическим данным [3], что безусловно влияет на их достоверность. Соответственно, учет и цифровое моделирование пространственного распределения бугристых торфяников, как объектов, маркирующих южную границу криолитозоны представляется достаточно актуальной задачей.

Исследование включало инвентаризацию бугристых болот и определение климатических и топографических параметров, которые регулируют их формирование и устойчивость. Всего для формирования выборки было определено 190 объектов, относящихся к бугристым болотам. Из них 60 на территории Кольского полуострова, а 130 объектов были взяты из сходных условий Северной Финляндии [2]. Для точности моделирования добавлены вспомогательные 215 точек отсутствия бугристых болот. Топографические параметры определены по данным ArcticDEM [4]. На основе цифровой модели рельефа определены параметры: высота, экспозиция, топографический водный индекс (TWI), топографический индекс местоположений (TPI). Климатические параметры среды получены из набора данных WorldClim [5]. На основании предложенных данных рассчитаны средняя годовая температура (AMT), диапазон годовых температур (TRANGE), градусо-дни оттаивания (TDD), градусо-дни промерзания (FDD), градусо-дни с температурой более 5°C (GDD5), морозный индекс (FROST), суммарное годовое количество осадков (PRECIP), сумма жидких осадков (LPRECIP), сумма твердых осадков (SPRECIP). По имеющимся данным эти предикторы характеризуют распространение бугристых болот [6]. Статистическое моделирование проводилось с использованием алгоритма машинного обучения random forest (RF). RF это метод ансамблевого машинного обучения, который создает многочисленные деревья решений. Исходная выборка разделялась на две части – для обучения использовали 80% точек, а тестовая проверка проводилась на оставшихся 20%. Моделирование территорий, подходящих для бугристых болот проведено в вариантах с использованием: (1) только климатических переменных; (2) климатических и топографических переменных (Рис.).

По результатам перекрестной проверки при использовании шести климатических факторов точность составляла 0.79. Наибольшая точность достигалась при использовании всех предикторов. Тогда как при добавлении топографических данных точность модели возрастала до 0.85. Для сравнения, точность моделей классификации для бугристых болот Северной Финляндии была 0.77 [7], а Северной Америки 0.85 [6]. Значения AUC для прогнозирования зон существования бугристых болот при использовании алгоритма RF для климатических факторов составляет 0.877, для всех факторов – 0.907.

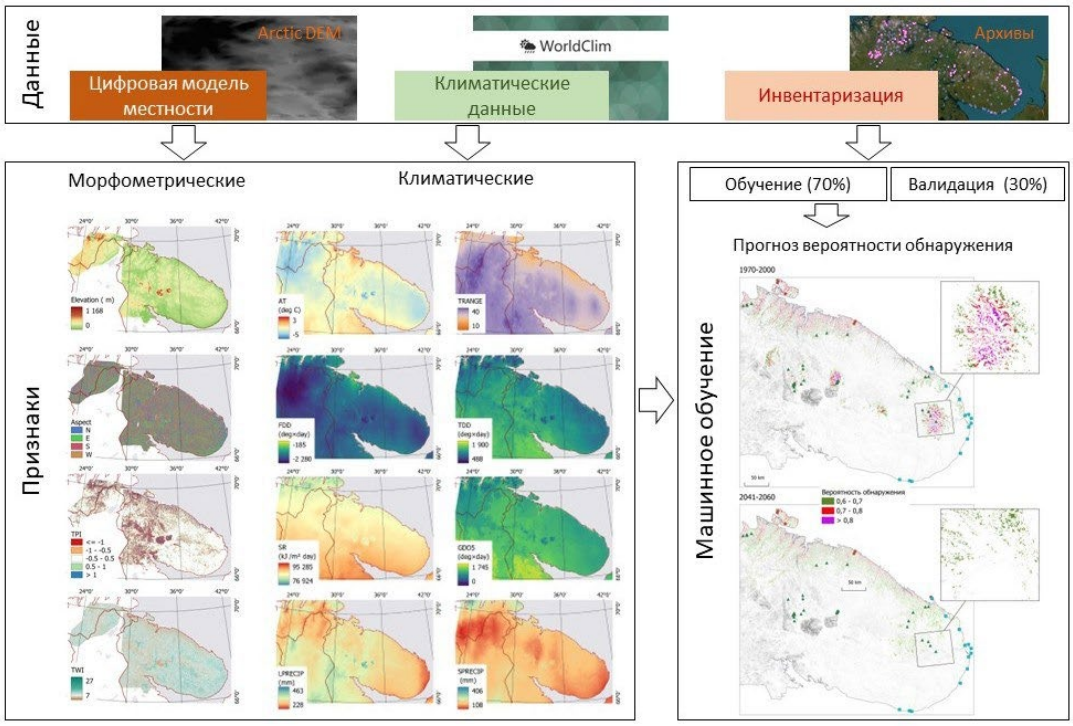


Рис. 1. Алгоритм прогнозирования распространения и динамики бугристых болот на Кольском полуострове.

На основе модели RF с использованием климатических и топографических переменных проведено прогнозирование потенциальных местоположений бугристых болот. Зоны с наибольшей вероятностью (>80%) расположены на северном побережье Кольского полуострова. Также локальные зоны выявлены восточной и центральных частях исследуемой территории. Прогнозирование зон распространения бугристых болот на период 2041–2060 г. при использовании климатической модели с умеренным сценарием выбросов, показало возможность значительного снижения распространения этих криогенных объектов. На основании чего можно предположить сдвиг южной границы криолитозоны на Кольском полуострове, а также определить оптимальные площади для отслеживания реализации смоделированного сценария.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 22-77-10055 https://rscf.ru/project/22-77-10055/

1. Olefeldt D. et al. Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes // Nature Communications. – 2016. – Vol. 7. – 13043.
2. Романенко Ф.А., Гаранкина Е.В. Формирование и строение многолетнемерзлых пород у южной границы криолитозоны на Кольском полуострове // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16. – №. 3. – С. 72–80.
3. Leppiniemi O. et al. Environmental spaces for palsas and peat plateaus are disappearing at a circumpolar scale // The Cryosphere. – 2023. – Vol. 17. – P. 3157–3176.
4. Porter C. et al. ArcticDEM-Strips, Version 4.1 // Harvard Dataverse. – 2022.
5. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. – 2017. – Vol. 37. – №12 – P. 4302–4315.
6. Fewster R.E. et al. Drivers of Holocene palsa distribution in North America // Quaternary Science Reviews. – 2020. – Vol. 240. – 106337.
7. Luoto M. et al. Spatial modelling of palsa mires in relation to climate in northern Europe // Earth Surface Processes and Landforms. 2004. – Vol. 29. – P. 1373–1387.

ДИСТАНЦИОННЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ПРИЛЕДНИКОВЫХ ОЗЁР НА ПРИМЕРЕ НОВОЙ ЗЕМЛИ

Серова Д. А.
Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, Москва
serovada@my.msu.ru

Приледниковые озёра распространены практически во всех районах современного оледенения и могут выступать в качестве индикаторов изменения режима ледников [2]. Среди явлений, демонстрирующих связь приледниковых озёр с изменениями ледников, можно выделить увеличение уровня моря, прорывы ледниковых плотин, рост озёр при отступании ледников [1].

По данным каталога ледников России [3], на Новой Земле с середины 20 века наблюдается медленное деградирование оледенения (580 км^2 или 2,4% площади), в результате чего многие части заливов и долин освободились ото льда, что могло привести к образованию новых гидрологических объектов.

Для оценки количества озёр на Новой Земле использовался нормализованный водный индекс (NDWI = (GREEN-NIR)/(GREEN+NIR)): на изображении со спутника Sentinel-2 были выделены области со значениями индекса более 0,5. Полученные полигоны прошли отсев по минимальной площади, равной 2000 м^2, также были удалены полигоны, расположенные на склонах и на расстоянии более 10 км от ледников. Затем была произведена оценка количества озёр, их распространения и изменения за несколько десятилетий с использованием данных о приледниковых озёрах за 1990 и 2020 гг. [2].

По оценке исследования, в 2024 году на Новой Земле количество приледниковых озёр по сравнению с 2020 г. незначительно уменьшилось, а по сравнению с 1978 г. – выросло примерно в 1,5 раза. Изменения в площади крупных (более 1 км^2) озёр связано с отступанием краевых частей ледника. Появление и увеличение новых озёр происходит в местах уменьшения языков ледника. Например, для ледника Низкий на 2024 г. отмечено образование крупного озера в южной части языка и увеличение количества и площади озёр в западной и северо-восточной частях, в то время как в 1978 г. в каждой из местностей наблюдается лишь россыпь мелких озёр. Многие крупные озёра, например, озеро Ледниковое площадью 71 км^2 (на 2024 г.) в 1978 г. представляет собой несколько несоединённых озёр меньшей площади, что свидетельствует об их дальнейшем развитии и объединении в одно озеро.

Предполагается, что в общем количество приледниковых озёр на Новой Земле увеличивается, но из-за метеорологических условий отдельных лет может наблюдаться уменьшение.

Отмечается, что при автоматическом дешифрировании идентифицируется множество мелких объектов. В исследованиях за 1990 и 2020 г. озёра площадью менее 0,1 км^2 составляют 40–50% от общего количества, а для 1978 и 2024. – 88–89%, что может свидетельствовать об удобстве использования программ автоматического дешифрирования для идентификации мелких объектов.

1. Zhang, G., Carrivick, J.L., Emmer, A. et al. (2024) Characteristics and changes of glacial lakes and outburst floods. Nature Reviews Earth & Environment vol. 5: p. 447–462. DOI: https://doi.org/10.1038/s43017-024-00554-w;
2. Zhang, T., Wang, W., An, B. (2024) Heterogeneous changes in global glacial lakes under coupled climate warming and glacier thinning. Communications Earth & Environment vol. 5: №374. DOI: https://doi.org/10.1038/s43247-024-01544-y;
3. Каталог ледников России, ИГРАН, 2022

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ДОЛГИХ ПЕРИОДОВ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Смульский И.И.
Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН ФИЦ, Тюмень
jsmulsky@mail.ru

100 лет назад Милутин Меланкович создал орбитальную теорию палеоклимата, в которой повторяющиеся ледниковые периоды объяснялись колебаниями солнечного тепла, то есть инсоляции. Эти колебания обусловлены колебаниями орбиты Земли. Однако изменение инсоляции были небольшие (рис. 1, линия *L*), и они не совпадали с известными изменениями палеоклимата.

Так как эта причина колебания климата казалось мне разумной, то в конце XX века я решил эту теорию проверить и решить по-новому все входящие в неё проблемы. В результате было установлено, что задача об эволюции вращательного движения Земли ранее не была решена. Я ей решил, и колебания инсоляции возросли в 7-8 раз (рис. 1), а ее экстремумы совпали с колебаниями палеоклимата, которые были установлены геологами в XX веке.

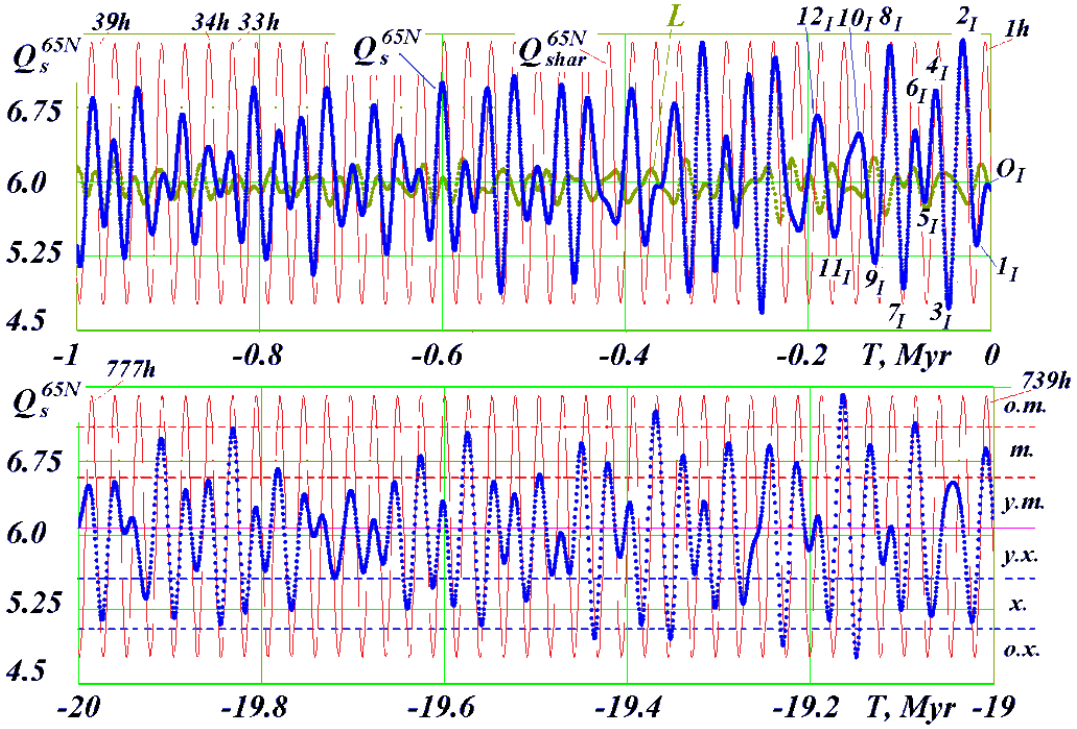


Рис. 1. Колебания летней инсоляции Q_s^{65N} на двухмиллионных интервалах времени за *T* = -1 Myr и -20 Myr. Q_s^{65N} – в ГДж/м^2; Q_{shar}^{65N} – гармоника (1); O_I, 1_I, 2_I,… 12_I – экстремумы инсоляционных периодов изменения климата за 200 т.л.н.; *1h*, *39h*,…, *739h*, *777h* – номера максимумов гармоники (1); *L* – изменение летней инсоляции Q_s^{65N} согласно прежней Орбитальной теории изменения климата на примере работы (Laskar et all, 2004).

На верхнем графике рис. 1 синей линией показано изменение за 1 м.л.н. инсоляции за летнее калорическое полугодие Q_s^{65N} на широте 65° Северного полушария. Эта величина является характеристикой климата в высоких широтах. На интервале 200 тыс. лет назад (рис. 1 верхний график) были введены 13 инсоляционных периодов изменения палеоклимата O_I, 1_I, 2_I, , , 12_I (Смульский, 2016).

Период O_I называют оптимумом голоцена. Небольшое потепление в нем отмечает ряд исследователей (Сакс, 1953; Баулин, 1959; Ломанченков, 1966; Васильчук, 1982; Ершов, 1989; Некрасов и др., 1990) [1]. Период 1_I в Западной Сибири называют Сартанским ледниковым периодом, или последним ледниковым максимумом (Архипов, 1997; Архипов и др. 1980; Арсланов и др., 1983; Svendsen et al, 1999; Архипов, 2000). Период 2_I называют Каргинским теплым периодом, значительно более теплом чем оптимум Голоцена (Макеев и др., 1979; Гроссвальд, 1983; Арсланов и др. 1983; Архипов, 1997; Svendsen et al, 1999; Лаухин и др, 2006; Гросвальд, 2009; MacDonald et all, 2012; Илларионов, 2013). Период 3_I называют предпоследним ледниковым максимумом, который был более суровым, чем первый 1_I. В западной Сибири его называют Ермаковским ледниковым периодом

(Волков и др., 1969; Волков, Архипов, 1978; Архипов и др., 1980; Svendsen et al, 1999; Архипов, 2000; Гросвальд, 2009).

Периоды 4_I - 6_I в Западной Сибири отмечают как Казанцевское межледниковье с двумя небольшими потеплениями 4_I и 6_I (Волкова, 1991; Архипов и др.,1995; Архипов, 1997); Слои этого теплого периода перекрывают морену ледникового периода 7_I (Архипов, 1997). Согласно унифицированной региональной стратиграфической схеме четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины выделены тазовский ледниковый горизонт (9_I) ширтинский теплый (10_I), самаровский ледниковый (11_I), и тобольский теплый горизонт (12_I) (Волкова, 1999; Гусев и др., 2019). Отмечаются слои еще более древнего теплого периода 14_I с максимумом 239 т.л.н. (Гусев и др., 2019).

Все инсоляционные периоды на рис. 1 имеют свои особенности и не повторяются. В соответствии с этими особенностями они проявляются в потеплениях и похолоданиях, которые происходили за последние 250 тыс. лет.

Как видно из графиков рис. 1, колебания инсоляции Q_s^{65N} неравномерные. Значительные потепления и похолодания следуют не регулярно. Однако почти все колебания согласуются с гармоникой Q_{shar}^{65N}, показанной тонкой красной линией:

$$Q_{shar}^{65N} = Q_0 + Q_a \sin(\varphi_0 + 2\pi T / P_{prm}), \quad (1)$$

где Q_0 = 6.099 ГДж/м^2; Q_a = 1.2711 ГДж/м^2; φ_0 = 0; T – время в тыс. лет; P_{prm} = -25.7478 тыс. лет – средний период прецессии оси вращения Земли.

На нижнем графике рис. 1 изменения инсоляции Q_s^{65N} показаны за 20-й м.л.н. Из сравнения инсоляции с гармоникой Q_{shar}^{65N} на всех графиках за 20 млн. лет следует, что значительные экстремумы инсоляции совпадают с экстремумами гармоники, или находятся вблизи них. Поэтому период прецессии P_{prm} оси Земли является основным периодом изменения климата Земли.

Были также введены (Смульский,2016) три градации теплого климата: умеренно теплый, теплый и очень теплый уровни; и три холодного: умеренно холодный, холодный и очень холодный уровни. На графике за -20 Myr на рис. 1 границы между уровнями показаны пунктирными линиями. Эти границы отстоят на одинаковое значение ΔQ_s от средней за 20 м.л.н. летней инсоляции Q_s^{65N} и равной Q_{sm}^{65N} = 6.055 ГДж/м^2, которая показана горизонтальной оранжевой линией.

Многие представляют ледниковые периоды как похолодания на всем земном шаре. Это не так. Количество тепла, поступающего на Землю, не изменяется. Изменяется его распределение по широтам Земли. В очень холодные периоды в высоких широтах тепла становится меньше за летнее полугодие. Поэтому снег не успевает растаять и образуется ледниковый покров. В это время в экваториальных широтах тепла поступает больше. В эти периоды зимы на всей Земле становятся теплее. Это способствует увеличению снежного покрова в высоких широтах, а, следовательно, и росту ледников.

В очень теплые периоды в высоких широтах тепла летом больше, чем сейчас на экваторе. Поэтому тают полярные ледники, в том числе ледники Гренландии и Антарктиды. А зимы – холодные и малоснежные, поэтому ледники за зиму не восстанавливаются. Это приводит к увеличению уровня океана и затоплению низменностей. Так что при общем постоянстве количества солнечного тепла, эти колебания климата происходят по всему земному шару.

1. Смульский И.И. Инсоляционная причина долгопериодических изменений климата // Геофизические процессы и биосфера. 2024. Т. 23, № 2. С. 25–39. DOI: 10.21455/GPB2024.2-3. https://www.ikz.ru/~smulski/Papers/IPDIKl03_1JP.pdf.

БАЗА ДАННЫХ ТЕРМОДЕНУДАЦИОННЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА И КРИОГЕННЫХ ОПОЛЗНЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Тарасевич И.И. [1,2], **Нестерова Н.Б.** [3,4], **Кизяков А.И.** [2]
[1] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия
[2] Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[3] Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, г. Потсдам, Германия
[4]University of Potsdam, г. Потсдам, Германия
i.i.tarasevich@mail.ru

Термоденудационные формы рельефа (ТФР) – термоцирки и термотеррасы – и криогенные оползни скольжения (КОС) характеризует приуроченность к районам распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород. Основной механизм роста таких форм – вынос оттаявшего материала вниз по склону.

Повсеместно отмечается активизация ТФР и КОС, в том числе – на севере Западной Сибири [1]. В связи с интенсивным развитием технологий искусственного интеллекта стало возможным автоматизированное дешифрирование этих форм на основе космических снимков и цифровых моделей рельефа. При этом неизбежно отмечаются неточности, связанные с недостаточным пространственным разрешением снимков, отсутствием единого сверхвысокодетального покрытия и наличием трудностей в интерпретации неоднородных форм рельефа. По-прежнему актуальным остается ручное картографирование местности.

В настоящей работе вручную проведена идентификация и классификация ТФР и КОС на севере Западной Сибири по данным мозаик космоснимков в онлайн-сервисах Esri World Imagery, Яндекс Карты и Google Maps. Составлена первая детальная база ТФР и КОС для территории, ограниченной на юге широтой Северного полярного круга и включающей в себя территорию полуостровов Ямал, Гыданский и Тазовский.

Для идентификации ТФР и КОС проведено создание на территории регулярной сетки с ячейками 3,3×3,3 км. Дешифровочные признаки ТФР (термоцирков) описаны в [2]. Для КОС дешифровочными признаками выступило наличие оползневого тела и обнаженной поверхности скольжения с эрозионными потоками.

Каждой выделенной форме рельефа, расположенной не на морском побережье, присваивалась уникальная точка в виде векторного формата географических данных. При идентификации ТФР, расположенных на морских побережьях, принято, что малые водотоки и овраги разделяют единый контур вытянутой формы рельефа на несколько отдельных частей, имеющих свою точку.

Проведена классификация ТФР и КОС на севере Западной Сибири. Классы выделены по следующим основаниям:

Морфология – термоцирк, термотерраса, комбинированная форма рельефа, криогенный оползень скольжения;

Положение в рельефе – морское побережье, берег реки, берег озера, овраг, склон;

Пространственное распределение – единичная форма, комплексная форма;

Сопутствующие процессы – термоэрозия, термоабразия, термоэрозия по полигонально-жильным льдам, термокарст, нивация.

По результатам работы выделено и проклассифицировано 6176 ТФР и свыше 500 КОС (рис. 1). База данных ТФР и КОС находится в обработке. Планируется сопоставление с данными регионального картирования мерзлотных условий севера Западной Сибири и результатами автоматизированного дешифрирования ТФР, опубликованными в научной литературе.

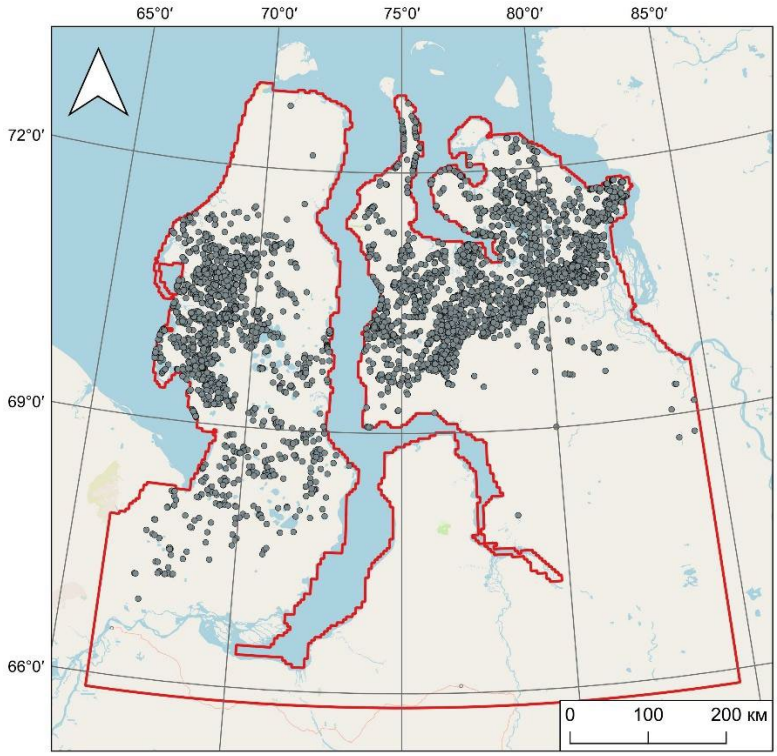


Рис. 1. Идентифицированные ТФР на севере Западной Сибири (подложка OpenStreetMap).

Работа выполняется Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

1. Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of cryogenic earth flows and formation of thermocirques in Central Yamal as a result of climate fluctuations. In: Mikoš K., Vilímek V., Yin Y., Sassa K. (eds). Advancing culture of living with landslides. WLF 2017. Cham: Springer International Publishing AG; 2017. P. 209–216. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53483-1_2

2. Нестерова Н.Б., Хомутов А.В., Лейбман М.О., Сафонов Т.А., Белова Н.Г. Инвентаризация термоцирков на Севере Западной Сибири по данным мозаики спутниковых снимков 2016–2018 годов // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 6. С. 41–50. https://doi.org/10.15372/KZ20210604

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОПАСНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СКЛОНОВЫХ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ТЕРМОЦИРКОВ НА ЦЕНТРАЛЬНОМ ЯМАЛЕ

Хомутов А.В.[1], Бабкина Е.А.[1], Бурдак Д.В.[2], Данько М.М.[1], Левочкина О.В.[1], Лейбман М.О.[1], Хайруллин Р.Р.[3]

[1] *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия*

[2] *Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия*

[3]*b.geos GmbH, Корнойбург, Австрия*

artcryo@ya.ru

С начала XXI века в российской и зарубежной Арктике на фоне тренда повышения температуры воздуха широкое распространение получили криогенные склоновые процессы, связанные с вытаиванием подземных льдов – криогенные оползни течения (КОТ). Они образуют комплексные формы рельефа (КОТФР, по Лейбман и др., 2023), среди которых основными являются термоцирки и термотеррасы. Если рассматривать криогенные оползни течения с образованием термоцирков как наиболее деструктивный рельефообразующий криогенный процесс на севере Западной Сибири, это делает особо актуальным картографирование опасности проявления этого процесса.

Исследования показали, что основным фактором, влияющим на формирование КОТ является достижение сезонным протаиванием кровли пластового льда или сильнольдистых многолетнемерзлых пород (Бабкина и др., 2019; Хомутов и др., 2024).

Для территории Центрального Ямала на примере одного из ключевых участков выявлены пространственные закономерности залегания пластовых льдов и ландшафтные индикаторы дифференциации глубины залегания пластовых льдов, построена карта глубины залегания кровли пластового льда на ландшафтно-геоморфологической основе (Хомутов и др., 2012). Наименее глубоко пластовые льды залегают в останцах высоких поверхностей и относительно неглубоко под протяженными слабо переработанными денудацией водоразделами – своеобразными хранилищами крупных залежей пластовых льдов. Более глубокое залегание в днищах долин и озерных котловин связано с вытаиванием льда как в голоценовом оптимуме, так и в настоящее время под действием отепляющего влияния водных масс и техногенного воздействия.

В работе предлагается методика оценки опасности проявления КОТ с последующим образованием термоцирков, апробированная для территории ключевого участка «Васькины Дачи» на Центральном Ямале, на основе:

- ландшафтно-геоморфологической дифференциации территории, использованной для картографирования глубины залегания пластовых льдов (Хомутов и др., 2012), а также оценки опасности проявления криогенных оползней скольжения (КОС) (Хомутов, Лейбман 2016);
- выявленных особенностей активности термоцирков (Хомутов и др., 2024);
- мониторинга ключевых термоцирков (Khomutov et al., 2017; Тарасевич и др., 2022),

Ранее была предложена оценка опасности КОС, в которую заложен принцип малой вероятности появления КОС на участках их современного развития. Этот принцип неприменим для КОТ. В пределах зарастающих или стабильных, в прошлом активных, термоцирков могут вновь сойти КОТ при увеличении суммы положительных температур воздуха за счет достижения сезонным протаиванием кровли пластового льда.

Работа выполняется Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факащук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 99-109.

Лейбман М.О., Кизяков А.И., Нестерова Н.Б., Тарасевич И.И. Классификация криогенноползневых форм рельефа для целей картографирования и прогноза. Проблемы Арктики и Антарктики. 2023;69(4):486-500.

Тарасевич И.И., Кизяков А.И., Лейбман М.О., Письменюк А.А., Нестерова Н.Б., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Динамика термоденудации на Центральном Ямале за 2017-2021 гг. по данным ежегодного мониторинга // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 9, 2022, С. 253–257.

Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А. Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг. Проблемы Арктики и Антарктики. 2024;70(2):222-237.

Хомутов А.В., Лейбман М.О. Оценка опасности проявления криогенных оползней скольжения в тундре Центрального Ямала // Криосфера Земли, Т.XX, №2, 2016, С. 49–60.

Хомутов А.В., Лейбман М.О., Андреева М.В. Методика картографирования пластовых льдов Центрального Ямала // Вестник Тюменского государственного университета, №7, 2012, Науки о Земле, С. 76–84.

Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of cryogenic earth flows and formation of thermocirques in Central Yamal as a result of climate fluctuations. In: Mikoš K., Vilímek V., Yin Y., Sassa K. (eds). Advancing culture of living with landslides. WLF 2017. Cham: Springer International Publishing AG; 2017. P. 209-216.

ПАРАГЕНЕТИЧЕСКИЕ СОЧЕТАНИЯ ПЖЛ С ПЛАСТОВЫМИ И ВТОРИЧНЫМИ ЛЬДАМИ: ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$) КАК ИНДИКАТОР УСЛОВИЙ И ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ

Чижова Ю.Н.[1], Кузякин Л.П.[2], Васильчук Ю.К.[2]
[1] Институт географии РАН, Москва
[2] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
eacentr@yandex.ru

Повторно-жильные льды (ПЖЛ) являются одним из наиболее распространенных типов подземного льда в криолитозоне и информативным природным палео-архивом. Поскольку повторно-жильный лёд образуется из смеси снега и талой снеговой воды, попадающих в морозобойную трещину, изотопные характеристики ПЖЛ отражают изотопный состав атмосферных осадков зимнего сезона, которые в глобальном масштабе зависят от температуры воздуха. Это делает изотопный состав ПЖЛ надежным инструментом палеотемпературных реконструкций (Васильчук, 2006; Opel et al., 2018). С одной стороны, механизм формирования ПЖЛ достаточно хорошо изучен, с другой – парагенетическое сочетание ПЖЛ в одном разрезе с другими типами льда открывает дополнительные возможности для понимания условий и процессов формирования мерзлых толщ. Парагенез (парагенезис) – это совместное нахождение объектов, возникающее в результате одновременного или последовательного образования (Геологический словарь, 2011).

Наиболее частым случаем парагенетического сочетания являются системы ПЖЛ-пластовый лед и ПЖЛ-термокарстово-полостной лед. Сочетание ПЖЛ с вмещающими жилы пластовыми льдами было описано нами на Центральном Ямале вблизи стационара Васькины Дачи (Чижова и др., 2021). Описанные ПЖЛ, залегающие в сильнольдистом слоистом суглинке, характеризовались значениями δ18O от −23 до −27‰. Вмещающий жилы ледогрунт был датирован методом AMS по общему органическому углероду в 13 кал. тыс. лет и характеризовался значением δ18O= −22,6‰. Ледогрунт, вмещающий ПЖЛ, был деформирован между жил, и его форма отражала морфологию полигональных ванн (Чижова и др., 2021). Таким образом, пластовый лед является сингенетическим сегрегационным льдом, образованным в условиях неглубокого обводнения. Близость значений δ18O жильного и пластового льдов может указывать на то, что локальное обводнение на поверхности третьей морской террасы происходило преимущественно за счет зимних осадков с участием талых вод, связанных с локальным термокарстом по ПЖЛ в ходе сингенетического промерзания.

Сочетание повторно-жильного льда (ПЖЛ) с термокарстово-полостным льдом было описано в обнажении голоценового полигонального торфяника вблизи г. Лабытнанги. Установлено, что значения δ18O от −14,4 до −19,35‰ жильного льда частично изменены вторичными процессами, связанными с подтоплением, последующим замерзанием свободной воды и образованием вторичного термокарстово-полостного льда со значениями около δ18O −13‰. Наиболее выражено это на боковых контактах жил, центральная часть жильного льда не претерпела изменений. Наиболее интригующим оказалось полное заполнение ростка, пробивающего кровлю одной из жил, вторичным термокарстово-полостным льдом. Эпизод значительного протаивания жил, скорее всего, был связан с подтоплением этой части торфяника ближайшим озером. Последующее промерзание обводненных вмещающих жилы отложений с большим количеством свободной озерной воды привело к формированию сложного сочетания разных типов льдов в одном разрезе.

Работа выполнена при поддержке РНФ проект №25-27-00233.

Геологический словарь, т.2. Третье издание. СПб.: изд-во ВСЕГЕИ. 2011 Недра. 1973. 478 с.

Васильчук Ю.К. Повторно-жильные льды; гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2006. 404 с.

Чижова Ю.Н., Бабкин Е.М., Хомутов А.В. Изотопный состав кислорода и водорода повторно-жильных льдов Центрального Ямала. Лёд и Снег. 2021. 61(1). 139-148.

Opel T., Meyer H., Wetterich S., Laepple T., Murton Ju. Ice wedges as archives of winter paleoclimate: A review. Permafrost and Periglacial Processes. 2018. 29. 199-209.

СООТНОШЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ СИНГЕНЕТИЧЕСКОГО И ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНОГО ЛЬДООБРАЗОВАНИЯ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ПОЗДНЕМ КВАРТЕРЕ

Шейнкман В.С., Седов С.Н., Гравис А.Г.
Институт криосферы Земли, ФИЦ ТюмНЦ СО РАН, Тюмень,
vlad.sheinkman@mail.ru

Особенности эволюции и соотношение сингенетического и эпигенетического полигонально-жильного льдообразования на севере Западной Сибири в позднем квартере – важный фактор геокриологического развития данной территории, но, как это ни парадоксально, в литературе он освещен мало. Условия и история формирования полигонально-жильных льдов (ПЖЛ), существующих сегодня на севере Западной Сибири, выяснены уже на представительном уровне (Васильчук и др., 2000, Стрелецкая и др., 2015), но южнее зоны их распространения, граница которой проходит несколько севернее полярного круга – примерно по параллели 68° с. ш., в предыдущие холодные эпохи должны были закономерно получать развитие древние ПЖЛ, однако их следы изучены слабо – по ним имеются лишь редкие и краткие описания, выполненные еще в 1960-е гг. (Дубиков, 1962; Шмелев, 1966; Данилов, 1972). Причем не раскрыто, какое развитие было им присуще – по сингенетическому или эпигенетическому типу, хотя распознание этого феномена важно и в плане выяснения специфики промерзания горных пород, связанной с трансгрессивно-регрессивной динамикой Арктического бассейна. Исходя из этого, авторы провели исследования, чтобы восполнить данный пробел.

Существующие севернее 68° с. ш. современные ПЖЛ – сингенетические образования, начавшие развитие с похолоданием климата после казанцевского, МИС5, термохрона, а вмещающие их осадки в синкриогенном режиме формировались непрерывно, включая сравнительно теплые этапы МИС3, каргинского, времени, и голоцена. Это показали (Васильчук и др., 2000, Стрелецкая и др., 2015) надежные данные временной привязки и изотопного исследования ПЖЛ. Их сингенетический формат связан с воздействием морских трансгрессий со стороны Арктики (Розенбаум, Шполянская, 2000), когда: во-первых, морские осадки периодически перекрывали отложенный ранее аллювий впадающих в Карское море рек, и, во-вторых, накапливался констративный аллювий в низовьях этих рек при повышении базиса эрозии в период трансгрессий. Поэтому ПЖЛ росли по типу клин-в-клин практически до современности, и общая высота жил порой превышает 20 м. Отдельно отметим сингенетические ПЖЛ мощных торфяников, налагаемых на осадочную толщу в заболачиваемой местности. Эти ПЖЛ возникли в начале голоцена, существуют также за полярным кругом, и несмотря на относительно короткое время своего развития, достигают в такой среде 5-м высоты (Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., 2016).

Казалось бы, южнее этой зоны должны осуществляться поиски следов былых ПЖЛ с постановкой вопроса о том, какой формат был у них, как они связаны с трансгрессивно-регрессивным воздействием Арктического бассейна – чтобы показать всю картину развития ПЖЛ в регионе. Но ответов на эти вопросы до последнего времени не было, несмотря на то что Г.И. Дубиковым (1962) они были поставлены более полувека назад (хотя сделанные им описания следов ПЖЛ были схематичны и касались только побережья Обской губы).

Для получения репрезентативных данных по этим вопросам авторы провели исследования несколько южнее полярного круга вдоль имеющих субширотную ориентацию притоков рек Пур и Надым, т.е. в ареале потенциального развития ПЖЛ в прошлом – в обрывах террас этих рек вскрыты отложения, несущие интересующую нас информацию. Вся территория здесь расчленена на морфоструктурные блоки (Варламов, 1982; Трофимов и др., 1987), и благодаря блоковой тектонике (Шейнкман и др., 2020) выделяется несколько террасовых уровней в диапазоне отметок от 10–15 м до 110–115 м. На сегодня на междуречье Пур–Надым авторами обследованы террасы среднего и нижнего уровня, чтобы выяснить были ли они доступны для морских трансгрессий и в каких условиях в их пределах шло промерзание пород.

Терраса среднего уровня имеет отметки 50–60 м и хорошо отслеживается в центральной части междуречья Пур–Надым вблизи гг. Новый Уренгой и Пангоды вдоль р. Евояха (левый приток р. Пур) и р. Правая Хетта (правый приток р. Надым), текущих примерно вдоль полярного круга – всего на полградуса южнее его. Врез рек здесь составляет 10–15 м, вскрывая строение ясно выраженного равнинного аллювия, который имеет МИС3, каргинский, подтвержденный серией ^{14}С-дат возраст. Оно говорит о том, что накоплен аллювий в синкриогенном пойменном режиме в условиях промерзания пород средней силы: по всей его толще, исключая приповерхностные слои, ступенчато расположены изначально-грунтовые жилы (ИГЖ) и нет следов глубокого промерзания. Но в МИС2 вся эта толща с поверхности была рассечена ПЖЛ эпигенетического типа: датированные псевдоморфозы по ним,

следуя через 8–12 м, ясно выражены и имеют вид широкоугольного треугольника высотой около 3 м при ширине по верху около 2 м. Причем вверху жил породы, вмещающие былые ПЖЛ отжаты в стороны и вверх. Иными словами, уже несколько южнее зоны современных ПЖЛ в центральной части междуречья Пур–Надым фиксируется, что в долинах рек, дренирующих данную территорию, в МИС3 формировался только синкриогенный, в пойменном режиме, аллювий с ИГЖ, но без участия ПЖЛ. В конце МИС3 его толща испытала блоковое поднятие, и приповерхностные слои образованных тогда террас в криохрон МИС2 были препарированы процессами низкотемпературного криогенеза, уже в субаэральных условиях, включая формирование ПЖЛ эпигенетического типа.

От г. Пангоды р. Правая Хетта поворачивает на юго-запад, течет по долине, перпендикулярно р. Надым и впадает в него в 100 км от его устья у Обской губы – на стыке с его левым притоком, р. Хейгияха – на широте еще на полградуса южнее полярного круга. Здесь уровень воды в реке имеет отметки лишь 10–15 м, и хорошо выражены на этом участке фрагменты менее поднятой низкой террасы с отметками поверхности 20–25 м, причем характерно: она сложена тем же, с расположенными ступенчато ИГЖ, аллювием и с поверхности также препарирована в субаэральных условиях низкотемпературными криогенными процессами, включая формирование ПЖЛ эпигенетического типа, псевдоморфозы по которым имеют аналогичное, как и в предыдущем случае, строение и датированы временем МИС2.

Таким образом, проведенные исследования показали, что на севере Западной Сибири следы былых ПЖЛ ярко проявлены уже вдоль полярного круга. Но фон их развития существенно иной, чем у имеющихся севернее 68° с. ш. ПЖЛ, связанных с длительным синкриогенным накоплением осадков в зоне трансгрессивно-регрессивного воздействия Арктического бассейна. Следы ПЖЛ южнее полярного круга фиксируют их развитие вне этой зоны по эпигенетическому типу и лишь в период сартанского, МИС2, криохрона, так как в предыдущее МИС3, каргинское, время здесь шло накапливание аллювия при температуре пород выше необходимых для развития ПЖЛ значений, хотя и близких к ним, о чем говорит наличие по всей толще МИС3 аллювия, на разной высоте, генетических предшественников ПЖЛ – ИГЖ. К концу МИС3 накопление осадков прекратилось ввиду поднятия и стабилизации поверхности террас, и в криохрон МИС2 они стали рассекаться ПЖЛ, но не сингенетического, а эпигенетического типа. Поэтому крупных размеров ПЖЛ тогда не достигали – в среднем их высота составляла около 3 м при ширине по верху около 2 м.

Работа выполнена при поддержке программы по госзаданию FWRZ-2021-0005.

7. ПОЧВЫ В ЗОНЕ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИДЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ И ТЕРМИОНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В ИЗУЧЕНИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА КРИОГЕННЫХ ПОЧВ

Е.В. Абакумов
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
E_abakumov@mail.ru

Климатическая повестка во многом определяется содержанием углерода органических соединений в почвах, биоседиментах и горных породах криолитозоны Земли. Основное внимание ученых при изучении этих объектов уделяется гравиметрическому (массовая концентрация) и волюметрическому (запасы в объеме почвы) содержанию углерода. При этом, часто ошибочно говорят просто об углероде в почве или экосистеме, хотя речь идет либо об углероде органических соединений, либо об углероде неорганических веществ. Методы определения содержания углерода органических соединений весьма разнообразны и, в связи с различным происхождением и спецификой молекулярной организации органического вещества дают существенные ошибки на гравиметрическом уровне, которые, естественно, при дальнейших расчетах и экстраполяциях отражаются и на качестве определения или оценки запасов органического вещества (этот термин, нередко путается, собственно, с углеродом без всякого пересчета или трансфера). Уже на уровне терминологии у специалистов по моделированию, особенно у тех их них, кто не относится к почвоведам, возникает много ошибок и путаницы. Еще одна проблема – различное пониманием терминов почвенное органическое вещество (soil organic matter) и гумус (humus) в российской и зарубежной литературе. Если бы это различие имело только семантические последствия, то практических трудностей было бы не так много. Проблема заключается в учете фракций органического вещества – одни коллективы тщательно удаляют все неколлоидное вещество перед анализом и учетом, другие – наоборот оставляют почти все или даже все, что попало в отобранную пробу. Даже при единстве методов окисления и дальнейшего учета окисленного (прямой способ) или неокисленного (косвенный метод) органического вещества, ошибки пробоподготовки, связанные с пониманием того, что входит в гумус или органическое вещество оказываются весьма существенными. Принимая во внимание тот факт, что запасы углерода органических соединений в почвах криолитозоны колоссальны, то здесь есть что обсудить. Если сюда добавить условности тех экстраполяций, которые делаются для малоизученных ландшафтов Сибири с сильно кластеризованными данными, то встает вопрос о монетизации углеродных экосистемных услуг и о качестве тех углеродных единиц, которые будут использоваться в отчетности климатических проектов игроками энергетического сектора криолитозоны. Возвращаясь к вопросу о качестве и количестве органического вещества, следует сказать, что очень мало используется понятие о его стабилизации. Так, 1 кг/кв м углерода органического вещества в черноземах степи ЕТР и равная величина в криогенной степи Забайкалья – точно не равные величины по качеству и потенциальной усточийвости к минерализации. Кроме того, в черноземах ЕТР, как правило, почти нет резерва прекурсоров гумификации, поступающих не из биотического компонента, в том время как в криогенных черноземах они есть и их много. Вообще, вопрос о том, как будут себя вести прекурсоры гумификации при их высвобождении из законсервированных углеродсодержащих слоев почти не решается. Минерализация и потеря/переотложение углеродсодержащих веществ с латеральным и вертикальным стоком вполне очевидны. Но то, как будут встраиваться вновь появившиеся молекулы прекурсоров в структуру уже существующих молекул – это слабопредсказуемый и пока не смоделированный процесс.

Соотношение процессов гумификации и стабилизации органического вещества и проблема устойчивости пулов и отдельных форм содержания углерода органических соединений также обсуждается в докладе.

Биологическая активность криогенных почв – понятие крайне широкое и неустойчивое. Сюда относится эмиссия, измеренная в полевых условиях, базальное и субстрат-индуцированное дыхание, метаболический коэффициент, потенциально-минерализуемая доля углерода (PMc). Вообще, биологическая активность редко сознательно разделяется от микробиологической. А это принципиально для почвенно-процессной трактовки получаемых массивов данных. Эта почвенно-генетическая интерпретация данных, вообще представляет огромную проблему: в контексте

климатических проектов «углеродный след» и соответствующие экосистемные услуги оценивают ученые самых различных специальностей, забывая или, вообще - не зная о почвенных и экосистемных процессах.

Все методические проблемы в тезисах обсудить невозможно. Тем не менее есть еще одна, важная, на наш взгляд проблема: функциональная роль отдельных групп микроорганизмов в трансформации органического вещества. Современные методы метабаркодинга и высокопроизводительного секвенирования позволяют получать огромное количество данных о таксономическом составе микробиома почв. При этом литература переполнена очень вольной интерпретацией функционала представителей различных филумов, семейств или родов микроорганизмов, что имеет основания лишь предположительном смысле и не подтверждается ни лабораторными опытами, ни исследованием метаболических путей. Для почв криолитозоны эта проблема стоит особенно остро.

Существующие «углеродные» проекты, в том числе и важнейшие, государственного уровня, быстро развиваются, часто, при этом – достаточно успешно. Но если говорить о почвах криолитозоны, то здесь методологическое и методическое сопровождение имеет целый ряд нерешенных проблем, которые требуют дискуссии и дальнейшей рецепции научным сообществом, и в первую очередь – теми его представителями, кто не связан изначально с классической химией и биологией почв.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект No 24-44-00006.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВАХ ПОЛЯРНЫХ РЕГИОНОВ ЗЕМЛИ: ОЦЕНКИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЯМР-СПЕКТРОСКОПИИ

Алексеев И.И.[1], Грек Е.Н. [1,2], Четверова А.А. [1]
[1] Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, РФ
[2] Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, РФ
alekseevivan95@gmail.com

Стабильность и способность к биологическому разложению являются ключевыми характеристиками почвенного органического вещества (ПОВ), которые следует принимать во внимание при оценке текущих и потенциально возможных запасов органического углерода, а также при оценке качества и динамики изменения органического вещества. Стабильность ПОВ связана со степенью гумификации, поскольку более продвинутые стадии процесса гумификации включают в себя истощение пула лабильных молекул, а также увеличение общей ароматичности, что придает более высокую стабильность ПОВ. Спектроскопия ^{13}C-ЯМР предоставляет информацию о разнообразии функциональных структур углерода (разновидности углерода) и используется для оценки изменений ПОВ во время разложения и гумификации.

Наша работа направлена на характеристику молекулярной структуры органического вещества, определение его потенциальной уязвимости в почвах полярных регионов Земли (на примере трех районов Ямало-Ненецкого автономного округа - пос. Новый Порт, Ныда, г. Новый Уренгой, г. Салехард, также оазисах Восточной Антарктиды – оазис Ширмахера и Бангера).
Твердотельная ^{13}C-ЯМР спектроскопия гуминовых кислот, выделенных согласно общепринятой методике International Humic Substances Society [IHSS, 1981], показала низкое количество ароматических фрагментов в большинстве исследованных почв. Все изученные почвы характеризуются преобладанием алифатических структур, а также углеводов, полисахаридов, простых эфиров и аминокислот. Было обнаружено, что все исследованные гуминовые кислоты арктических почв имеют наиболее интенсивные пики в районе 175 ppm, что соответствует карбоксильной С-группе. Это объясняет более интенсивную гумификацию в мелкоземе этих почв вместе с образованием более развитой периферийной алифатической части гуминовых кислот. Результаты, полученные с помощью ^{13}C-ЯМР спектроскопии, выявили лишь небольшие различия в молекулярном составе гуминовых кислот по географическому градиенту исследуемых участков в ЯНАО. Это может быть связано с однородным составом растительности и схожими климатическими условиями. В некоторых предыдущих исследованиях было показано, что арктические почвы могут содержать более стабильные ароматические компоненты по сравнению с алифатическими, но мы не обнаружили такой особенности в изученных почвах. Преобладание алифатических форм углерода в изученных нами гуминовых кислотах также свидетельствует о ранних стадиях процесса гумификации в изученных почвах. Это согласуется с результатами предыдущих исследований (хотя и эпизодических) в различных секторах Сибири.

^{13}C-ЯМР спектры гуминовых кислот (ГК), выделенных из изученных почв Восточной Антарктиды, значительно отличались от спектров, описанных ранее в почвах Маритимной Антарктики. Наблюдались различия в элементном составе и атомных соотношениях O/C, H/C и C/N, а также преобладание периферической части над ароматическими фрагментами. Все исследованные почвы в оазисе Ширмахера и Бангера характеризуются преобладанием алифатических структур. Кроме того, ГК содержат значительное количество углеводов, полисахаридов, сложных эфиров и аминокислот.

В целом, результаты исследования указывают на принципиальную возможность гумификации даже в условиях отсутствия ароматических фенилпропановых прекурсоров. Также было показано, что в суровых климатических условиях Антарктиды возможно образование гуминовых кислот с ярко выраженной ароматической и периферической частью. По атомным отношениям H/C–O/C гуминовые кислоты изученных почв Восточной Антарктиды также скорее ближе к фульвокислотам почв бореального пояса Северного полушария. Отношение C/N в изученных ГК почв довольно низкое, что связано с низким содержанием углерода в молекулах периферических соединений при существенной доле азота, что в целом свидетельствуют о низкой степени гумификации органического вещества.

Данное исследование было поддержано грантом Российского Научного Фонда, проект № 24-27-00361 «Почвы оазисов Восточной Антарктиды: биогеохимия, стабильность органического вещества и экологические риски».

О ТИПАХ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОЧВ НА ЮЖНОЙ ГРАНИЦЕ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАБАЙКАЛЬЯ

Бадмаев Н.Б., Гынинова А.Б., Цыбенов Ю.Б., Мангатаев А.Ц.
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ
nima_b@mail.ru

На основе иерархического принципа почвенно-географического районирования последовательно выделены новые пространственные границы таксономических единиц почв юга Витимского плоскогорья (ЮВП)и севера Селенгинского среднегорья (ССС). Использование междисциплинарных методов картографии и информационного анализа позволило определить общие параметры топоэкологических ниш и значительно расширить по Новой классификации почв России (2004, 2008) ареалы отделов структурно-метаморфических и палево-метаморфических почв.

Буроземы мерзлотные формируются под лиственничными лесами на водораздельных позициях на элювиально-делювиальных продуктах выветривания неогеновых и нижне-плейстоценовых базальтов. Палевые мерзлотные занимают пологие склоны северных экспозиций под березовыми лесами, где встречаются тяжелосуглинистые продукты выветривания вулканических пород палеоген-неогенового возраста и близкое залегание мерзлоты. Экологической нишей криоаридных почв с неполным хрящевато-щебнистым профилем являются крутые склоны и увалы южной экспозиции под криоксерофитными степями на плотных каменистых породах, продуктах разрушения нижне-палеозойских гранитоидов. Ранее выделяемые каштановые почвы занимают более пологие ландшафты под ксерофитными степями и характеризуются полным профилем и ярко выраженным карбонатным горизонтом.

Использование разработанного авторами проекта атмосферно-почвенного измерительного комплекса позволило составить численную типизацию по тепловому, водному и мерзлотному режимам почв и провести классификационную оценку температурного режима почв по Димо В.Н. (1972). Для каждого выделенного типа почв, на основе объективных количественных показателей определены типы (мерзлотный и длительно сезоннопромерзающий) и подтипы температурного режима почв: а) по среднегодовой температуре почвы на глубине 0.2 м (℃) – очень холодный и холодный; б) по температуре летнего и зимнего периода почвы на глубине 0.2 м (℃) – очень холодный / холодный и холодный; в) по степени континентальности (глубина 0.2 м (℃) – резко континентальный и континентальный).

Анализ температурного поля почв в суточной ритмике показывает, что на всех выделенных почвах ЮВП и ССС отмечается фазовый переход почвенной влаги в весенний (апрель-май) и осенний (октябрь-ноябрь) периоды. Необходимо подчеркнуть о том, что в весенний период в два раза выше регистрируется частота фазовых переходов почвенной влаги и больше амплитуда колебаний, а также глубже проникают отрицательные температуры до 20 см.

Установлено, что процессы промерзания-протаивания в суточной ритмике чаще наблюдаются в поверхностных горизонтах степных почв, чем лесных, в которых отмечается «гашение» и инерционность колебаний температуры. Среди лесных почв, в березовых лесах промерзание и протаивание в палевых почвах чаще и глубже, чем в буроземах лиственничных и смешанных лесов, в силу отсутствия мощной подстилки и моховой подушки.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В КРИОГЕННЫХ ПОЧВАХ НАДЫМСКОГО РАЙОНА ЯНАО

В. Ван[1], Е. В. Абакумов[1], Т. И. Низамутдинов[1], А. С. Печкин[2]
[1] ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия
[2] ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», Салехард, Россия
e-mail: st082527@student.spbu.ru

В настоящем исследовании представлены результаты распределения содержания микроэлементов в районах распространения криогенных почв в окрестностях г. Надым (Ямало-Ненецкий автономный округ, ЯНАО) в России. Почвенные пробы были отобраны из тундровых экосистем, залежных агроэкосистем и городских экосистем в Надымском районе ЯНАО. Результаты исследований показали, что 1) Почвы Надымского района ЯНАО представлены преимущественно альфегумусовыми и торфяными отделами. 2) В почвенных профилях Надымского района ЯНАО распределение содержания микроэлементов связано с содержанием органического углерода и общего азота, типом почвы (агродерново подбуры иллювиально железистые) и воздействием антропогенной деятельности (технотурбации). 3) Основными источниками микроэлементов в криогенных почвах Надымского района ЯНАО являются почвообразующие породы, дальний атмосферный перенос, предшествующая сельскохозяйственная деятельность и транспорт. 4) Криогенные почвы Надымского района ЯНАО находятся в практически незагрязнённом состоянии.

Данная работа выполнена при поддержке Российский научный фонд (№ 24 44 00006) и Китайского стипендиального совета (201907010003).

Wang, W., Nizamutdinov, T., Pechkin, A., Morgun, E., Li, G., Wu, X., Yang, S., Abakumov, E. Ecological status assessment of permafrost affected soils in the Nadym Region, Yamalo Nenets Autonomous District, Russian Arctic // Land. – 2024. – V.13, – No. 9, – P. 1406. – DOI 10.3390/land13091406.

ПУТИ РАЗВИТИЯ ПОЧВЕННО-МЕРЗЛОТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ТУНДР СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Гинзбург А.П.*, Лупачев А.В.
Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино
ginzburgap@yandex.ru

Почвенно-мерзлотный комплекс (ПМК) – мерзлотная почва, переходный и промежуточный слои (ПС, ПрС) многолетнемерзлых пород (ММП) (по Шуру, 1988) со взаимообусловленными строением и свойствами (Lupachev, Gubin, 2023), – оказывает комплексное влияние на функционирование и динамику тундровых экосистем криолитозоны севера Западной Сибири.

В зависимости от сочетания ландшафтно-геокриологических характеристик территории, развитие ПМК и, вследствие, всей экосистемы на фоне положительного климатического тренда, может происходить по одному из, как минимум, 4 описанных путей. Они были выделены по результатам анализа ландшафтно-геокриологических матриц территорий (Ривкин и др., 2017). Ключевую роль в процессах развития ПМК играет изменение мощности сезонноталого слоя (СТС).

Первый путь «равномерной осадки» типичен для плоских горизонтальных и субгоризонтальных поверхностей мезорельефа, сложенных легкими (песчаными и супесчаными) мало- и среднельдистыми отложениями. Увеличение мощности СТС происходит относительно равномерно по площади при вытаивании ПС и ПрС, провоцируя вертикальную осадку почвенного профиля практически без нарушения строения горизонтов. Благоприятные условия дренажа способствуют оттоку талой воды из горизонтов почвообразующих пород, предотвращая гидроморфизацию почв. Значительных изменений в направлении радиального потока миграции вещества не происходит, но активизируется вымывание соединений из вытаявших ПС и ПрС.

Развитие ПМК по второму пути «течения» встречается на пологонаклонных приводораздельных поверхностях, пологих склонах и в замкнутых понижениях, сложенных относительно более тяжелыми отложениями. Суглинки и глины наиболее восприимчивы к перенасыщению влагой в результате вытаивания средне- и высокольдистых ПС и ПрС, при этом в условиях затрудненного дренажа на склонах развиваются крип и солифлюкция. Этот путь может быть реализован как в один этап (на выраженных в мезорельефе склонах), так и в два: на первом из них формируется термокарстовая котловина со значительными для развития склоновых процессов перепадами высот, на втором усиливается латеральный сток вещества. Развитие ПМК по второму пути сопровождается более значимой структурной реорганизацией почвенного покрова, чем в случае первого пути. Рост крутизны склонов способствует развитию катенарных сопряжений почв и активизации латерального перемещения вещества в них. Происходит смыв верхних горизонтов почв в верхних частях склонов, транзит вещества через средние, и переотложение в нижних частях. В результате формируются полициклические профили почв (Чевычелов, Шахматова, 2018), погребенные под солифлюкционными наплывами. Почвы в низовьях склонов обогащаются илистой фракцией и рядом химических веществ, а автоморфные почвы характеризуются их оттоком. Структура растительного покрова также усложняется.

Третий сценарий «блокового смещения» происходит в результате развития криогенно-оползневых форм рельефа (Лейбман и др., 2023) на средних и крутых склонах. Он сопровождается обнажением текстурных или залежеобразующих льдов с последующей активной их деградацией, вне зависимости от литологического состава отложений. ПМК в этом случае полностью разрушается, а вещество переотлагается в ложе термоденудационной формы мезорельефа. Подобное может происходить также в ходе разрушения высокольдистых отложений с обрушением крупных блоков ММП, содержащих ПМК, в стенках обрывов (в т.ч. береговых линий озер, рек и морей). На первый взгляд, этот сценарий подразумевает лишь разрушение и полную потерю функций почвенного покрова, но на переотложенном материале ПМК и нижележащих ММП, постепенно начинается син-, а затем и постлитогенное почвообразование. Подобные почвы наиболее близки по механизму образования к стратоземам, то есть, почвенный покров приобретает крайне контрастные сочетания на уровне ствола почвообразования. Параллельно эти почвы заселяют растительные сообщества с «аномальным» видовым разнообразием, вследствие обогащения субстрата, в т.ч. литогенными химическими веществами (Ермохина, Мяло, 2013), скорость миграции и аккумуляции которых при развитии криогенно-оползневых форм рельефа крайне высока.

Четвертый путь «новообразования» объединяет процессы формирования новых ПМК. Он состоит в постепенном сокращении мощности СТС и нарастании новообразованной системы ПС и ПрС. ММП в настоящее время формируются по сингенетическому типу в тундрах при дифференцированной осадке поверхности (Ривкин, Булдович, 2024), сокращении мощности слоя нулевых годовых амплитуд температуры на низких морских лайдах (Васильев и др., 2018), а также

вследствие перекрытия участков поверхности почв оползневыми телами. Следовательно, в пределах лож термоденудационных форм мезорельефа четвертый путь развития ПМК может являться закономерным продолжением третьего. Уменьшение мощности СТС способствует сокращению объема веществ в биогеохимических циклах, а также усиливает интенсивность процессов криогенного массообмена в почвах.

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 25-17-00010).

1. Васильев А.А., Облогов Г.Е., Стрелецкая И.Д., Широков Р.С. Новообразование многолетнемерзлых пород на низких лайдах Карского моря // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 5, с 39–46. https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-5(39-46)

2. Ермохина К.А., Мяло Е.Г. Фитоиндикационное картографирование оползневых нарушений на Центральном Ямале // Изв. РАН. Сер. геогр., 2013, вып. 5, с. 141–148.

3. Лейбман М.О., Кизяков А.И., Нестерова Н.Б., Тарасевич И.И. Классификация криогенно-оползневых форм рельефа для целей картографирования и прогноза // Проблемы Арктики и Антрарктики, 2023, № 69 (4), с. 486–500. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500

4. Ривкин Ф.М., Булдович С.Н. Закономерности новообразования мерзлых пород на фоне положительного климатического тренда // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 1, с. 15–22. https://doi.org/10.15372/KZ20240102

5. Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармузин И.С. Закономерности изменения геокриологических условий в результате осадки мерзлых пород при оттаивании // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 26–34. https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(26-34)

6. Чевычелов А.П., Шахматова Е.Ю. Постпирогенные полициклические почвы в лесах Якутии и Забайкалья // Почвоведение, 2018, № 2, с. 243–252. https://doi.org/10.7868/S0032180X18020120

7. Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст / под ред. А.В. Павлова. Новосиб.: Наука. Сиб. отд-ние, 1988, 213 с.

8. Lupachev A., Gubin S. The soil–cryogenic complex: Evidence of late Pleistocene Holocene coevolution of permafrost and cryosols at the Kolyma Lowland. Permafrost & Periglac. Process., 2023, 1–14. https://doi.org/10.1002/ppp.2191

ДЛИТЕЛЬНОПРОМЕРЗАЮЩИЕ ПОЧВЫ ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ ЗЕЛЕНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ АЗРФ

Долгих А.В.[1,2], Корнейкова М.В.[2,3], Васенев В.И.[2]
[1] Институт географии РАН, Москва
[2] Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва
[3] Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты
dolgikh@igras.ru

Урбанизация – глобальный тренд, приводящий к необратимым изменениям растительности и почв на всей планете. Экологические последствия урбанизации особенно заметны в полярных регионах, где восстановление и развитие экосистем ограничивается климатическими (низкие температуры) и почвенными условиями (дефицит питательных веществ). Создание устойчивого зелёного экологического каркаса в новых районах и поддержание существующих объектов городской зелёной инфраструктуры в селитебной и рекреационных зонах городов АЗРФ является актуальной и важной задачей. В Европейской части АЗРФ многие города расположены либо вне криолитозоны, либо в них сократилась площадь распространения многолетнемерзлых пород и увеличилась мощность деятельного слоя. При этом длительность безморозного периода часто менее полугода, а устойчивый снежный покров держится до полугода. Исследовано разнообразие длительно промерзающих почв рекреационных и селитебных функциональных зон городов, действующих и заброшенных поселков Мурманской области, расположенных вне криолитозоны (г. Апатиты, г. Мончегорск, г. Мурманск, пос. Вайда-Губа, с. Териберка). Также использованы материалы исследований в г. Воркута, г. Нарьян-Мар, пос. Баренцбург, Пирамида (арх. Шпицберген), полярной станции Бухта Тихая (арх. Земля Франца Иосифа).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-17-00118

ПОТОКИ МЕТАНА В КРИОГЕННЫХ ПОЧВАХ МАРИТИМНОЙ АНТАРКТИКИ

Евграфова С.Ю.[1,2], Масягина О.В.[1], Кадуцкий В.К.[1], Бакаленко Б.И.[3], Тихонов А. Г.[3], Корец М.А.[1], Лупачев А.В.[4], Абакумов Е.В.[5], Мавлюдов Б.Р.[6], Тимшин А.А.[7], Флоринский И.В.[8]

[1] Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск

[2] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск

[3] Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

[4] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино

[5] Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра прикладной экологии, Санкт-Петербург

[6] Институт географии РАН, Москва

[7] Институте проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва

[8] Институт математических проблем биологии РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», Пущино

esj@yandex.ru

Текущие сценарии прогнозирования климата предполагают резкие изменения различных климатических параметров в полярных регионах. При этом, среднегодовое количество осадков является наиболее важным фактором с точки зрения почвенных аэробных/анаэробных условий, поскольку оно, в основном, определяет водонасыщенность почв и, следовательно, контролирует потоки метана (CH_4) в многолетнемерзлых породах (ММП). Модельные прогнозы оценок реакции ММП на потепление климата варьируют в очень широком диапазоне, от 10-90% (Möller et al., 2024), что связано с фундаментальной неопределенностью относительно потенциальной способности захороненного в ММП органического вещества (ОВ) к микробному разложению. Таким образом, в настоящий период требуются точные количественные данные о потоках парниковых газов (ПГ) в «критических» экосистемах (например, Антарктика), а также оценка реакции потоков ПГ гидротермических условий.

В период астрального лета нами была выявлена температурная чувствительность процессов поглощения/выделения CH_4 маритимными почвами, а также доказано наличие лаг-фазы в реакции микробных сообществ цикла CH_4 в этих почвах в ответ на изменение температуры воздуха. Исследование проведено для двух типов почв (Protic Arenosols (Turbic) и Skeletic Turbic Cryosols) маритимной Антарктики (п-ов Файлдс, о. Кинг-Джордж, Южные Шетландские острова). Показано, что автоморфные почвы Protic Arenosols (Turbic) и Skeletic Turbic Cryosols характеризовались метанотрофной активностью в диапазоне от -119.7 мкг CH_4 $м^{-2}$ $ч^{-1}$ до 0 мкг CH_4 $м^{-2}$ $ч^{-1}$, в то время как гидроморфные почвы Skeletic Turbic Cryosols в тот же период являлись как стоком, так и источником CH_4 (рисунок 1). (Evgrafova et al., 2025).

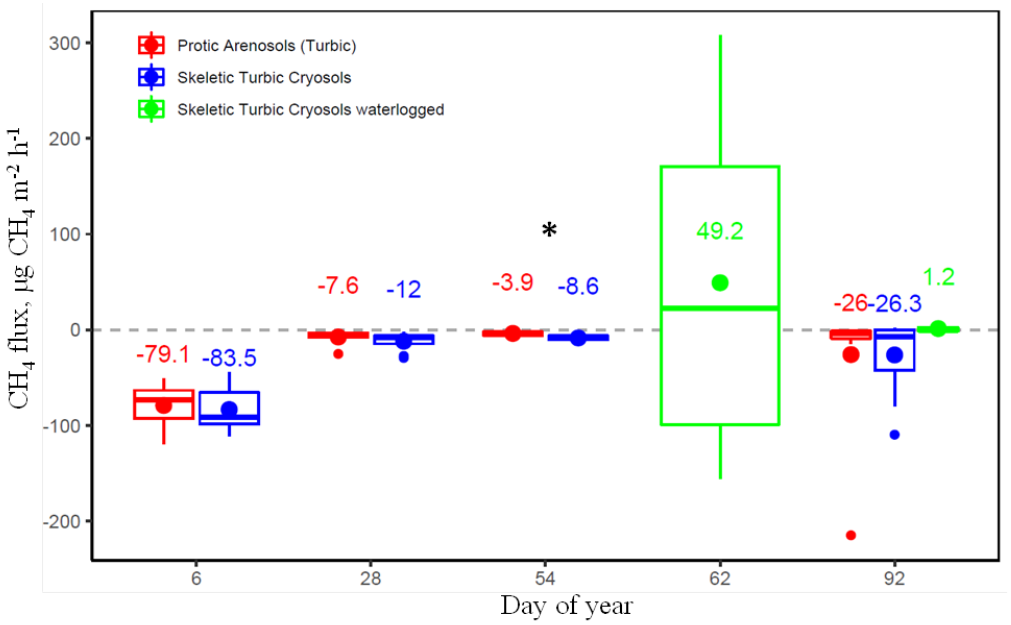


Рисунок 1. Динамические изменения потоков CH_4 с поверхности автоморфных почв Protic Arenosols (Turbic), Skeletic Turbic Cryosols, и гидроморфных почв Skeletic Turbic Cryosols в январе-феврале 2022 г. и марте-апреле 2023 г. Цифры – средние значения, звездочкой показано достоверное различие между типами почв.

Таким образом, показан диапазон колебаний потоков CH_4 с поверхности наиболее распространенных типов почв маритимной Антарктики в зависимости от гидротермических условий. Выявлено, что функциональный отклик микробных сообществ цикла CH_4 в этих почвах в ответ на изменения температуры воздуха протекает с задержкой (лаг-фазой) в месяц. Полученные точные количественные характеристики потоков CH_4 в маритимных почвах могут послужить важным ресурсом для моделирования потоков ПГ в меняющемся климате.

Evgrafova S.Yu., Kadutskiy V.K., Bakalenko B.I., Tikhonov A.G., Lupachev A.V., Abakumov E.V., Mavlyudov B.R., Korets M.A., Florinsky I.V., Timshin A.A., and Masyagina O.V. (2025) Maritime cryogenic Antarctic soils as a non-obvious methane source. Earth Systems and Environment, https://doi.org/10.1007/s41748-025-00602-5.

Möller T, Högner AE, Schleussner CF et al (2024) Achieving net zero greenhouse gas emissions critical to limit climate tipping risks. Nat Commun 15:6192

РАЗНООБРАЗИЕ И ГЕНЕЗИС МЕРЗЛОТНЫХ И ДЛИТЕЛЬНО СЕЗОННОПРОМЕРЗАЮЩИХ ПОЧВ ГОРНЫХ ТУНДР ПОЛЯРНОГО УРАЛА

Жангуров Е.В.[1], Шамрикова Е.В.[1], Королёв М.А.[1], Панюков А.Н.[1]
Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, г. Сыктывкар;
zhangurov@ib.komisc.ru

В горных ландшафтных условиях значительное влияние на формирование почв и почвенного покрова оказывают процессы криогенеза, результаты и действия которых выражены в виде: специфического криогенного микрорельефа, криотурбаций и тиксотропии в почвенных горизонтах, надмерзлотной верховодки и оглеения, криогенного ожелезнения и специфического оструктуривания минеральной массы, образования ледяных шлиров и различных криогенных текстур. В исследуемом нами регионе Полярного Урала (хребты Рай-Из, Енганепэ, Большой Пайпудынский) эти признаки имеют различную интенсивность и направленность и в максимальной степени выражены в горно-тундровом высотном поясе. В горно-лесном поясе проявление почвенного криогенеза выражено слабее, что объясняется нивелированием микроклиматических условий пологом лесной растительности.

Объектами исследований были выбраны почвы, сформированные на кислых, основных и карбонатных породах в различных типах ландшафтов горных тундр (260-800 м над ур.м) с выраженным криогенно-пятнистым типом микрорельефа. Были проанализированы физико-химические свойства, валовый и гранулометрический состав, классификационное положение почв – согласно «Полевому определителю почв России».

Суровые климатические условия (короткий вегетационный период, отрицательные значения среднегодовых температур воздуха, избыточное увлажнение) способствуют низкой интенсивности биологического круговорота и замедленной трансформации органического вещества поверхностных (подстилочно-торфянистых) и гумусовых горизонтах. Высокое содержание скелетно-грубообломочных фракций в почвенной толще и крутизна склонов обеспечивают свободный внутрипочвенный дренаж атмосферных осадков и отсутствие ММП в нижних горизонтах разрезов. Сохранение льдистой мерзлоты в пределах почвенного профиля на Полярном Урале возможно лишь в горно-тундровых ландшафтах с мощным торфяным горизонтом (30-40 см и более), где глубина сезонно-талого слоя составляет 50-55 см. Почвы – торфяно-глееземы криогенно-ожелезненные тиксотропные мерзлотные. В надмерзлотной толще глееземов основным механизмом криогенной дифференциации почвенной массы является восстановительная мобилизация железа, его миграция к фронтам промерзания и осаждение на окислительном барьере на верхней и нижней границе глеевого горизонта (горизонты криогенного ожелезнения Gcf). Актуальной задачей дальнейшего исследования этих почв является мониторинг температурного режима в системе СТС-верхний слой ММП и определение глубины сезонного протаивания.

Для почв с высоким содержанием щебня в верхней части профиля отчетливо выражена мерзлотная сортировка скелетно-грубообломочного материала: уплощенной формы плитняк пород поставлен “на ребро”, а на поверхности почвы выражены сортированные полигоны в виде каменных колец. Вышеуказанные признаки механических перемещений твердофазного материала под влиянием криогенных процессов позволяют выделить на уровне рода криосортированный подтип. Зерна минералов крупнопесчаных фракций (1,0-0,25 мм) имеют, как правило, угловатые (остроугольные) формы, что связано с процессами внутрипочвенного криогенного выветривания.

В условиях мозаичного растительного покрова горных тундр (кустарничково-зеленомошные, лишайниковые, ерниково-лишайниковые и т.д.) на элювиально-делювиальных отложениях кислых пород (граниты, песчаники, кварциты) формируются почвы: альфегумусового отдела (подбуры, подзолы); отдела глеевых (глееземы, торфяно-глееземы, глееземы криометаморфические); отдела криометаморфических (перегнойно-криометаморфические, дерново-криометаморфические); органо-аккумулятивных (серогумусовые); литоземы и др.

На элювиально-делювиальных отложениях основных (ультраосновных) пород с различной примесью кислого аллохтонного материала исследованы почвы: альфегумусового отдела (подбуры); отдела глеевых (глееземы криогенно-ожелезненные); отдела органо-аккумулятивных (серогумусовые).

Одним из наиболее ярких признаков длительных сезонных процессов промерзания и оттаивания выражены на макро- и микроморфологической структурной организации минеральной массы в виде формирования криометаморфических горизонтов (CRM) со специфической структурой. Почвы отдела: криометаморфических (дерново-криометаморфические, перегнойно-криометаморфические светлоземы), отдела глеевых (глееземы криометаморфические), органо-аккумулятивных почв (перегнойно-темногумусовые криометаморфические). В верхней и средней

части профиля для различных типов почв, сформированных на относительно мощных (60-90 см) и малощебнистых суглинистых отложениях, выражена горизонтальная делимость почвенной массы: линзовидные агрегаты толщиной до 1 см рассыпаются на мелкокомковатые (мелкоореховатые) и/или угловато-крупитчатые отдельности с размерами 4-8 мм по горизонтали и 3-4 мм по вертикали. В микростроении выражена угловато-блоковая (округлая) и тонкоплитчатая микроструктура, а также фрагментация ожелезненных растительных остатков. Воздействие фазовых переходов «вода ↔ лёд» проявляется в выветривании и дезинтеграции (сепарации) минералов песчаной размерности и в выдавливании пылеватых силикатных частиц в межагрегатные поры. Специфическая особенность гранулометрического состава почв с CRM горизонтом - преобладание крупнопылеватой фракции (40-50% от суммы всех гранулометрических фракций), являющейся наименьшим пределом механического диспергирования горных пород в результате криогенного выветривания и разрушения песчаных фракций.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР «Почвы и почвенные ресурсы Европейского Северо-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов», № 125021902454-1.

СПЕЦИФИКА ФОРМИРОВАНИЯ И МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПОЧВ ОСТРОВОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Каверин Д.А.[1], Хлопцова Д.Д.[2]
[1] *Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар,*
[2] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,*
dkav@mail.ru

Исследованы особенности формирования, строения и свойств почв высокоарктических и типичных тундр островов Баренцева моря (о. Мейбел арх. Земля Франца-Иосифа, о. Северный арх. Новая Земля, о. Колгуев). Изучение почвенного покрова Арктики важно с точки зрения оценки влияния климатических изменений на почвы. Прогнозируемое потепление окажет максимальное влияние на почвы Арктики. Почвенные разрезы на каждом острове закладывали по трансекте от береговой террасы к водоразделу, пересекающей характерные участки (фации) исследуемых урочищ. Определялись морфологические свойства почвенных горизонтов и классификационное положение почв, а также температура верхних (0-20 см) почвенных горизонтов и глубина сезонного протаивания.

Специфика островного почвообразования определяется морским арктическим климатом с коротким вегетационным периодом, низкой надземной биомассой, современным оледенением при повсеместном распространении многолетнемерзлых пород. Для высокоарктических тундр острова Мейбел (арх. Земля Франца-Иосифа) характерно формирование хорошо дренированных псаммоземов – маломощных почв с морфологическими признаками ожелезнения песчаных горизонтов. Средняя температура верхних (0-20 см) горизонтов составила +4,6±0,2 °С, что обусловлено высокой температуропроводностью сильнокаменистых почв. Глубина сезонного протаивания почв здесь достигала 0,6-0,9 м. Литоземы на острове Северный (арх. Новая Земля) отличаются оглеенностью и повышенной каменистостью профиля. Развитию оглеения способствует суглинистый состав почвенных горизонтов и неглубокое подстилание консолидированных сланцевых глыб. Верхние горизонты сильнокаменистых почв здесь хорошо прогреваются, их средняя температура составила +7,5±1,2 °С. Глубина сезонного протаивания почв здесь доходит до 1,2 м. На острове Колгуев исследованы почвы, характерные для типичных тундр: глеевые и торфяные олиготрофные. На острове распространены торфяные деструктивные почвы оголенных торфяных пятен в пределах полигональных болот северной тундры. На данном участке наблюдаются различия по температуре между торфяными (3,5 °С) и минеральными (5,2 °С) почвами. Измерения глубины залегания кровли ММП также показали вариативность от 0,2 до 1 м.

В целом, суровые климатические условия и фрагментарность почвенного покрова Арктики обусловливают формирование маломощных профилей при слабой морфологической выраженности почвенных горизонтов.

Исследование выполнено по результатам комплексной научно-образовательной экспедиции «Арктический плавучий университет – 2024» при поддержке темы госзадания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Почвы и почвенные ресурсы Европейского Северо-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов» № 125021902454-1.

КРИОТУРБАЦИИ В ПОЧВАХ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: РАЗНООБРАЗИЕ, ГЕНЕЗИС, ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

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

Почвы криолитозоны обладают рядом характерных признаков, наиболее ярким среди которых являются криотурбации. В большинстве почвенных классификационных школ криотурбации являются важным диагностическим признаком, позволяющим отнести почву с признаками криотурбаций к определенному типу. Так в классификации почв России (2004г) почвы с этими признаками рассматриваются на уровне отдела криогенных почв, состоящего из нескольких типов криоземов. Также на основе в том числе и этого признака предусмотрено выделение специфического криогенного горизонта CR. Однако в настоящее время отсутствует как четкое определение понятия «криотурбация», так и детальная классификация их разнообразия и механизмов образования. При этом многочисленные варианты криотурбаций свидетельствуют о разных процессах, происходящих или происходивших в исследуемой экосистеме, которые могут по-разному влиять на свойства почв и определять направленность процессов почвообразования.

Цель данной работы состояла в изучении вариантов криотурбаций в различных экосистемах севера Западной Сибири и попытке их классификации. В задачи также входила оценка влияния криотурбаций на свойства почв. Исследованы более 10 обнажений и более 50 почвенных разрезов в различных типах экосистем в пределах тундровой и северо-таежной зон с прерывистым или сплошным распространением многолетней мерзлоты. На основе данных полевых исследований было выделено широкое разнообразие криогенных деформаций в изученных почвах. Для почв мерзлых торфяников характерны классические криотурбационные деформации, представленные хаотичной системой сильнодеформированных горизонтов, напоминающей вихревой рисунок. Основной механизм их формирования связан с неравномерным пучением и протаиванием субстратов разного типа. Другим распространенным здесь вариантом криотурбаций являются линейные вытянутые, тонкие (1-3см) нарушения почвенных горизонтов (морозобойные трещины), заполненные, как правило, вышележащим торфяным материалом. Данный тип деформаций обусловлен активным морозобойным растрескиванием в пределах деятельного слоя. В обоих случаях наблюдается инверсия и перемешивание горизонтов, приводящие к значительным изменениям почвенных свойств (например, механическое затягивание органогенного материала в нижнюю минеральную часть почвенного профиля). На исследуемой территории широко распространены и специфические варианты криодеформаций, приводящие к значительной неоднородности почв. Благодаря криогенно-конвективному механизму, активизирующемуся при промерзании талого грунта, в профилях почв формируются небольшие (до 0,5 м) регулярные структуры округлой, кольцевой, каплевидной формы, образовавшиеся при вдавливании более плотного субстрата в менее плотный при промерзании (инволюции). Они могут быть представлены как минеральным суглинистым, так и органогенным торфяным субстратом, вмещенным в песчаные отложения. Еще одним распространенным вариантом являются крупные (0,5-3м) клиноподобные деформации, развитые в системе остаточно полигональной сети и являющиеся реликтом предыдущих эпох похолодания/потепления. Их формирование связано с вытаиванием повторно-жильных льдов и заполнением пустот окружающим субстратом. Расположенные по регулярной сетке практически на всей исследуемой территории они оказывают значительное влияние на почвообразование, перераспределяя преимущественные потоки почвенных растворов. Именно к криогенным деформациям данного типа в лесных автоморфных экосистемах часто приурочена активизация подзолообразования.

Таким образом на исследуемой территории фиксируется значительное разнообразие вариантов криотурбаций и механизмов их образования, обусловленных разновременной активизацией криогенных процессов. Криотурбации могут быть представлены как упорядоченными крупными образованиями округлой, каплевидной, клиноподобной формами с ровными границами, так и единичными слабодеформированными линейными структурами, а также неровными границами почвенных горизонтов с хаотичным вихревым рисунком. В зависимости от типа экосистемы и типа криотурбаций могут наблюдаться различные варианты их вклада в почвообразование, общей чертой которого является усиление неоднородности свойств почв и изменение преимущественных потоков почвенных растворов. Полученные данные свидетельствуют о недостаточности определения криотурбаций, как «мерзлотных нарушений в виде фрагментов органогенных горизонтов и вихревого рисунка минеральной массы» и необходимости расширения данного понятия и разработки их специальной классификации.

ПРОТОПОЧВЫ С МИКРОБНЫМИ ГОРИЗОНТАМИ: ИССЛЕДОВАНИЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ПОМОЩИ РАМАНОВСКОЙ МИКРОСПЕКТРОМЕТРИИ

Н.С. Мергелов
Институт географии РАН
mergelov@igras.ru

Протопочвы с микробными органогенными горизонтами занимают существенную часть суши и наиболее заметны в районах с экстремальными природными условиями (Антарктида, Высокая Арктика, высокогорья и пустыни), то есть там, где затруднено или невозможно развитие сосудистых растений. Последнее обстоятельство определяет специфический набор продуктов почвообразования, а также процессов накопления и трансформации углерода в таких объектах. Учитывая особенности микростроения протопочв с микробными горизонтами, для их изучения требуются чувствительные неразрушающие методы с высоким пространственным разрешением. В качестве одного из них может выступать рамановская микроспектрометрия, которая успешно применяется для изучения взаимодействий микроорганизмов и минералов в экстремальных условиях среды (Jorge-Villar, Edwards, 2013). Мы исследовали продукты органоминеральных взаимодействий в эндолитных, гиполитных (Антарктида, Новая Земля, высокогорная Атакама >4000 м) и супрагляциальных (Алтай, Кавказ) протопочвах. Выявлены кристаллические полиморфные модификации карбоната кальция (кальцит и арагонит), оксалаты, полиены с различной длиной цепи, сцитонемин, гематит, гетит, а также устойчивые ассоциации нескольких соединений, например, Fe-(гидр)оксид/каротиноид, карбонат/каротиноид, гипс/каротиноид и др. Показано, что в протопочвах формируются сложноустроенные органогенные микрогоризонты с возможностью длительной стабилизации (выведения из быстрого биогеохимического цикла) углерода как в органической, так и неорганической форме.

Работы выполнены в ЦКП ИГРАН «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии».

КРИОГЕННЫЕ ПСЕВДОМОРФОЗЫ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ОБ УТЕРЯННЫХ СЛОЯХ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЛЕТОПИСИ

Н.В. Мокиевский
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
n.mokievskiy@bk.ru

Работы проводились на Борисоглебской возвышенности расположенной в перигляциальной области последнего оледенения. Два ключевых участка расположены на напорных грядах московского оледенения (155м н.у.м.) и один на террасе озера Неро (100 м н.у.м.). Данный регион в Поздневалдайское время (МИС 2) входил в ареал распространения многолетних мёрзлых пород. (Величко др., 1996). На всех ключевых участках встречены криогенные псевдоморфозы (клинья), относящиеся, вероятно, к Ярославскому этапу криогенеза (Величко, 1973). На высоких уровнях клинья заполнены материалом, схожим по составу с материалом покровного суглинка. На нижнем – песком, предположительно, эолового происхождения. Покровные суглинки распространены на данной территории (Государственная…, 1976), однако на ключевых участках часто отсутствуют за приделами псевдоморфозы. Покровные пески на исследуемой террасе на геологической карте не обозначены, а песчаный материал отсутствует за пределами клина (рис.1).

Вероятным объяснением отсутствия материалов псевдоморфоз за их приделами является резкое усиление эрозионных процессов при деградации мерзлоты в конце Позднеледниковья (МИС 2). Сами же материалы заполнения свидетельствуют о распространённости эоловых процессов в Поздневалдайский криохрон. Можно так же предположить зависимость гранулометрического состава эоловых отложений данного времени от абсолютных высот поверхности, на которой они формировались. Эрозионный этап, связанный деградацией мерзлоты привёл к уничтожению непрерывного плаща эоловых отложений.

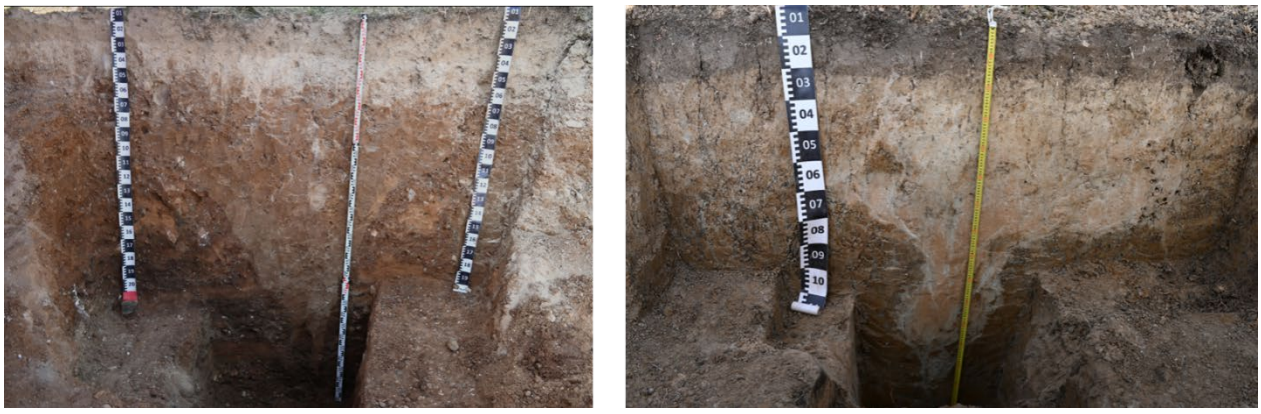


Рис.1. Криогенные клинья. Слева – суглинистый в морене, справа – песчаный в озёрном суглинке. Фото: д.г.н. А.В. Русаков.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-17-00073

1) Величко А. А. и др. Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. – 1996.
2) Величко А. А. Природный процесс в плейстоцене. М.: Наука. 256 с. – 1973.
3) Государственная геологическая карта четвертичных отложений, 1: 200 000: О-37- XXVIII – 1967.

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СИСТЕМУ ПОЧВЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА АГРОГЕННЫХ И ПОСТАГРОГЕННЫХ ПОЧВ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

Низамутдинов Т.И., Абакумов Е.В.
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
t.nizamutdinov@spbu.ru

Почвенное органическое вещество (SOM) играет важную роль в функционировании агроэкосистем. Количество и качество SOM влияет на плодородие почвы и ее структуру. Параметры SOM также служат надежным индикатором качества почвы, поскольку состав и молекулярная структура SOM могут изменяться под воздействием антропогенных и природных факторов. Как правило, переход пашни в залежь связан с постепенным улучшением агрегатного состояния почв и депонированием углерода, что обусловлено восстановлением естественного растительного покрова и накоплением некромассы микроорганизмов, однако процессы постагрогенной трансформации SOM в агроэкосистемах Арктики изучены слабо. Исследование хроноряда залежных почв в окрестностях г. Салехарда показало, что в почвах молодых залежей (5-10 лет) увеличивается содержание органического углерода. Однако с увеличением возраста залежей (>20 лет) происходит снижение его содержания и запасов до 2,15-2,27%, что может быть связано с минерализацией органического вещества из-за недостаточной его физической стабилизации. Доминирование кварца и малое количество реакционноспособных глинистых минералов и приводит к тому, что система органического вещества в изученных почвах уязвима к циклам замораживания-оттаивания, разрушающим ранее образованные органоминеральные микроагрегаты. Анализ органического вещества методом ^{13}C ЯМР спектроскопии позволил получить представление об изменениях в молекулярной структуре SOM: на активных полях было обнаружено доминирование алкильных молекулярных структур (40,88%), что свидетельствует о поступлении свежего органического вещества с органическими удобрениями, в то время как в почвах залежных земель наблюдалось постепенное увеличение O-алкилов (21,6%) и ароматических соединений (15,88%), что свидетельствует о поступлении грубых органических остатков и накоплении лигнина. Органическое вещество почвы Ямальской опытной агростанции продемонстрировало сходные с активными полями параметры благодаря долгосрочному (более 90 лет) внесению органических удобрений, сохраняя алкил-C (39,61%) и низкую ароматичность (ARM = 0,23). Можно предположить, что ключевые климатические стрессоры - короткий вегетационный период и циклы замораживания-оттаивания усиливают деградацию SOM в условиях его слабой физической стабилизации. Низкие температуры замедляют микробное разложение SOM, но потери органического вещества не компенсируются из-за ограниченного поступления углерода в заброшенные почвы и низкую скорость гумификации свежих органических остатков. Увеличение соотношения O:C (от 0,68 до 0,83) и снижение гидрофобности (HB/HI = от 1,44 до 1,19) в органическом веществе почв залежных земель подтверждают прогрессирующее окисление и потерю алкильных соединений. Проведенных многомерный статистический анализ дополнительно связал снижение количества углерода с выносом элементов питания (P, K) и снижением pH. Управление агроэкосистемами в условиях Арктики и Субарктики должно сопровождаться внесением органических удобрений (торфа, навоза, стойловых подстилок) для стабилизации углеродных пулов, о чем свидетельствуют параметры SOM Ямальской опытной агростанции.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 24-44-00006.

ВЛИЯНИЕ ПРОМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ МИГРАЦИЮ УГЛИСТЫХ ЧАСТИЦ ПО МИНЕРАЛЬНОМУ ПРОФИЛЮ ПОЧВ. МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Петров Д.Г.
Институт географии Российской академии наук, Москва
pd437807@mail.ru

Экосистемы, испытывающие совместное влияние как криогенных, так и пирогенных процессов широко распространены в России (Харук, Пономарев, 2020). После прохождения пожаров в почвы попадают продукты пирогенной активности. Часть из продуктов пожаров формирует пул пирогенного углерода, частично выходящего из биологического круговорота (Matthews, Sepäla, 2014; The pyrogenic…, 2014). Влияние физических процессов, связанных с промерзанием, на грунты и почвы, изучалось давно (Материалы по…,1954; Димо, 1972), однако мы нашли мало данных о связи мерзлотных процессов с миграцией пирогенного углерода. Цель данной работы на примере модельного эксперимента выяснить 1) происходит ли вертикальная миграция УЧ при промерзании-оттаивании по минеральному профилю почв и 2) выделить физические процессы, ускоряющие или тормозящие миграцию УЧ. Для эксперимента в пластиковые прозрачные контейнеры 20x20x10 см были отобраны три варианта грунта, сформированного из почвенного материала: 1) крупнопесчаный (П); 2) механическая смесь песчаного и суглинистого материала (50/50 по объему) (П+С) и 3) суглинистый (С). УЧ были перетерты до размера ~1 мм и перемещены на поверхность грунтов до достижения проективного покрытия (ПП) в 40-45% на поверхности грунтов. Условия эксперимента делились на комнатные (оттаивание) и в морозилке (промораживание). Комнатные условия имели: температуру воздуха 18-21°С и влажность воздуха 40-50%; условия в морозилке имели: температуру воздуха (-18)°С и влажность воздуха 10-15%. Сначала опыт проводился при естественной влажности грунтов (Рис. 1.А). После трех циклов промерзания-оттаивания к образцам дополнительно было добавлено 50 мл воды, затем 100; 200; 250; 300 и 300+ мл. Добавление воды осуществлено шприцем в зоны, где УЧ отсутствовали, чтобы избежать капельной эрозии. ПП УЧ изменялось в несколько этапов. На первом этапе при промораживании грунтов с естественной влажностью произошло резкое уменьшение ПП УЧ, что мы связываем с формированием трещин в грунте при расширении воды. В течение нескольких последующих циклов промерзания-оттаивания проективное покрытие УЧ не менялось. После добавления 50; 100; 200 мл воды ПП УЧ резко уменьшалось, пока не перешло в устойчивое состояние на 300 мл. Последующее увеличение добавленной воды не приводило к изменению ПП УЧ (Рис. 1Б). Кроме уменьшения ПП УЧ наблюдалось: 1) увеличение объема УЧ на этапах оттаивания образца на 2-3% (видимо, угли забирали воду из воздуха); 2) микропучение, что выражалось в перемещении детрита и крупных частиц к поверхности грунта, особенно в образце П+С, и (Рис. 1.Б); 3) льдообразование при добавлении воды свыше 50 мл; 4) разрушении УЧ до состояния пыли при добавлении 50 мл и более воды (видимо, разрыв при льдообразовании); 5) налипание разрушенных УЧ на минеральные частицы (УЧ адсорбированные на минеральной матрице); 6) разрушение агрегатов грунта – формирование сначала ооидной при добавлении 50-100 мл воды, а затем порошистой структуры (при добавлении 200-300+ мл воды). Адсорбированные на минеральной части почвы УЧ в дальнейшем не мигрировали вниз по профилю и именно ими обусловлено оставшееся в конце эксперимента ПП УЧ.

Получены следующие предварительные выводы: 1) Наиболее интенсивно миграция УЧ происходит в грунтах/почвах разного гранулометрического состава (П+С), т.к. в них идут интенсивные криотурбации; миграция УЧ в крупнопесчаных почвах обусловлена размером почвенных пор, сравнимым с размером маленьких и разрушившихся УЧ (0,5-1 мм). 2) Перемещение УЧ вниз по профилю происходит при переходе температур через 0°С и с поступлением в почву дополнительной влаги. 3) Разрушение УЧ ведет к их закреплению (адсорбировании) минеральной частью почв.

Работа проведена при финансировании Государственного задания Института географии РАН "Почвы и углеродный цикл природных и антропогенных экосистем в экстремальных и оптимальных условиях прошлого и настоящего, изучаемые с использованием передовых технологий" FMWS-2024-0010.

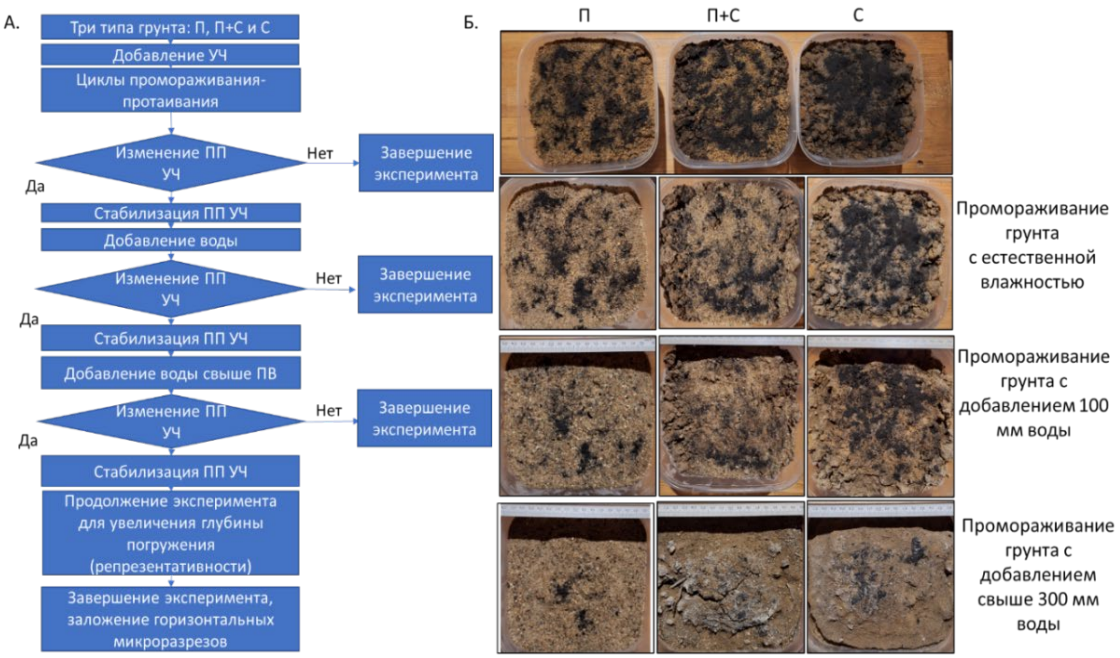


Рис. 1. А – дизайн эксперимента; Б – основные стадии эксперимента (ПВ – предельная влагоемкость)

Изменение ПП УЧ и сопутствующие процессы объединены на графике (Рис. 2).

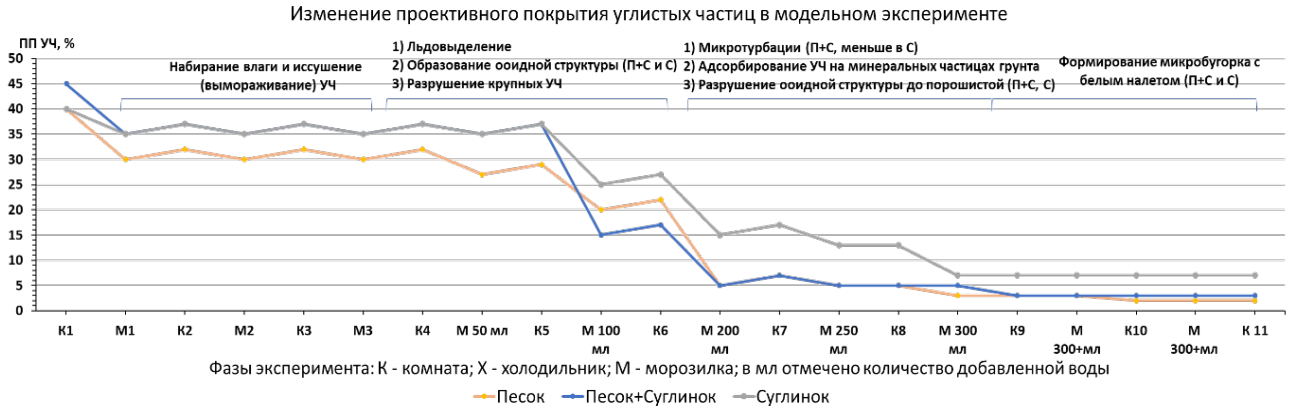


Рис. 2. Динамика ПП УЧ в зависимости от количества циклов промораживания-протаивания и количества добавленной воды

Димо, В. Н. Тепловой режим почв СССР / В. Н. Димо. – М. : Колос, 1972. – 360 с.

Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. Сборник 2. Инструктивные указания / отв. Ред. Н.А. Цытович // М.: Ин-т мерзлотоведения им. В.А. Обручева, Изд-во АН СССР, 1954, 238 с.

Харук, В. И. Пожары и гари сибирской тайги / В. И. Харук, Е. И. Пономарев // Наука из первых рук. – 2020. – № 2(87). – С. 56–81.

The Pyrogenic Carbon Cycle / M. I. Bird, J. G. Wynn, G. Saiz [et al.] // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 2014. – Vol. 43. – No 1. – P. 150223150959000.

Matthews J.A. Holocene colluvial chronology in a sub-arctic esker landscape at Kuttanen, Finnish Lapland: kettleholes as geo-ecological archives of interactions amongst fire, vegetation, soil, climate and geomorphological instability // J.A. Matthews, M. Sepäla / Boreas – 2014 – 40. – 2. – 343–367.

ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ КРИОГЕННОГО МИКРОСТРОЕНИЯ ПОЧВ КАК ОТРАЖЕНИЕ ДИСКУССИИ О СУЩНОСТИ КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Романис Т.В.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
romanis.tatyana@yandex.ru

Криогенное воздействие на строение и свойства почвенного профиля на территории распространения многолетнемерзлых пород не вызывает сомнения (Худяков, 1984; Соколов и др., 2006). Однако понимание того, в чем именно проявляется криогенное воздействие на профиль и как конкретно оно выражается в его морфологической перестройке на мезо- и микроуровнях, остается актуальным дискуссионным вопросом. Большая часть затруднений возникает из-за неустоявшейся терминологии.

В геокриологии под криогенезом понимается «…совокупность процессов, происходящих в верхних горизонтах литосферы (в том числе почвах), как в сформировавшихся породах различного состава и возраста, так и в накапливающихся осадках, вызванных их промерзанием и протаиванием, охлаждением и нагреванием (без оттаивания), изменением давления» (Романовский, 1993). В 80-х годах 20 века Макеев О.В., формируя терминологическую базу для криологии почв, так же определил криогенез как физический фактор почвообразования. Дополнительно им было сформулировано понятие «почвенный криогенез - совокупность процессов физического, химического и биологического преобразования почвенной толщи, происходящих в почвах вследствие влияния отрицательных температур, т. е. при промерзании, пребывании в промерзшем состоянии и при их протаивании» (Макеев, 1989). Отличается это определение повышенным вниманием к биологическим процессам, что, несомненно, важно для формирования почвенного профиля, но часто не является прямым следствием криогенного воздействия на него. Так же при работе с мерзлотными почвами идет подмена понятий и термину криогенез дается определение почвенного криогенеза (Еловская, 1987). В.В. Рогов отмечает включение биологических процессов в определение криогенеза почвоведами как достоинство, а не недостаток современной терминологии (Макеев, 2019). По мнению автора понимание под криогенезом всех процессов, происходящих в почвах в присутствии многолетнемерзлых пород и/или при их промерзании-протаивании, размывает границы этого понятия и не формирует основу для определения его диагностических признаков в строении почв. Благодаря разночтению в понимании сущности криогенеза в почвоведении сформировалось два подхода в диагностике элементов криогенного микростроения почв.

Первый подход рассматривает микростроение с позиции криопедологии и в настоящее время используется большинством исследователей. При этом строение почвенного профиля изучается при его максимальном протаивании в конце теплого периода, как в пределах сезонно-талого слоя (СТС) в криолитозоне, так и в пределах сезонно-мерзлого слоя (СМС) вне нее. Те признаки, которые отличают промерзающие почвы от непромерзающих, на основании сравнительно-географического подхода определяются как криогенные. При этом под «криогенным микростроением» большинство авторов, по сути, понимают совокупность элементов микростроения талых почв, объясняя их гипотетическим распределением льда перед этим, когда почва была в мерзлом состоянии, однако непосредственно в процессе промерзания или протаивания, а также в мерзлом состоянии, почвы не изучались. При таком подходе под криогенными признаками микростроения часто понимаются не только структуры, непосредственно созданные в результате льдовыделения или оттаивания, но и, к примеру, образованные в результате слишком быстрого разложения «криогенно раздробленных органических остатков». По мнению автора, через 1-2 месяца после протаивания микростроение почв отражает не только последствия криогенного воздействия, но и обычные для почв физико-химические и биологические процессы трансформации вещества, их агрегации в генетическом горизонте или миграции за его пределы. Получается, что при изучении талых образцов мы в лучшем случае можем наблюдать «посткриогенную» микроструктуру, роль криогенеза в формировании которой в большинстве случаев еще следует установить.

Второй подход рассматривает элементы криогенного микростроения с позиции криогенного воздействия, подобно принятому в геокриологии. Несомненный его плюс – экспериментальная верификация криогенного происхождения особенностей микростроения в талых образцах (Van Vliet-Lanoe, Coward, 1984). Например, при промораживании озерных глин с влажностью 20% и шлировым льдовыделением было показано, что характер стенок полостей, остающихся после вытаивания шлиров льда, отличается от трещин иссушения. Однако увеличение влажности глин меняло характер стенок трещин между агрегатами при циклическом промораживании-протаивания, что ставит этот диагностический критерий под сомнение. В этом подходе исследователями часто не учитывается

разнообразие и изменчивость криогенных текстур, возможных в СТС и СМС, географическая зональность, сезонные изменения направления миграции растворов в профиле почв.

По мнению автора**,** для определения роли криогенеза в формировании специфики микростроения мерзлых почв нужно опираться на результаты изучения механизмов образования мелких ледяных включений и шлиров, характеризуемых криогенной текстурой (КТ), т.е. их взаиморасположением в породе или почве. Типов КТ описано достаточно много, но для СТС и СМС их разнообразие ограничено (Втюрина, 1974; Жесткова, 1980). Почвоведы проводят параллель между листовидными агрегатами и слоисто-линзовидной КТ, плитчатыми агрегатами и сетчато-слоистой КТ, однако без внимания остаются атакситовая, массивная, корковая, порфировая и др. КТ. Каждый цикл промерзания приводит к перестройке ледяных шлиров и включений, хотя сам тип криогенной текстуры может оставаться неизменным, например, линзовидно-слоистым.

В настоящее время данные по криогенным признакам микростроения палеопочв все чаще используются как единственное доказательство их существования в прошлом в мерзлом состоянии. Однако при наличии большого количества вопросов к механизмам формирования элементов (пост)криогенного микростроения, отсутствии их корреляции с режимами промерзания и протаивания, микроморфологический метод анализа строения почв не является достаточным для решения палеомерзлотных реконструкций в настоящее время. Требуется обязательная верификация с использованием других признаков в палеопочвах на макро- и мезоуровне. Для решения этого вопроса необходимо установить систему признаков микростроения, характеризующих режимы промерзания и сохраняющихся в протаявшем состоянии. Создаваемая в настоящий момент в ИМЗ СО РАН база данных экспериментальных работ в России и мире, проводившихся для верификации особенностей криогенного дробления зерен минералов и характера их поверхности представляет собой первый шаг в систематизации материала о криогенном воздействии. Второй шаг - эксперименты по циклическому промораживанию модельных смесей для выявления связи образующихся микроморфоскопических признаков на поверхности зерен с характером формирующихся агрегатов и трещин. Диагностическая система разномасштабных признаков криогенного воздействия призвана ликвидировать имеющиеся пробелы в диагностике криогенного воздействия на современные и погребенные почвы.

В основе систематизации подходов к диагностике криогенеза в почвах лежат материалы полевых работ в современных почвах на едомах (базовый проект 122011800064-9) и экспериментальные работы по промерзанию-протаиванию модельных смесей (грант РНФ 23-77-10046).

Худяков О.И. Криогенез и почвообразование. Пущино: Научный центр биологических исследований АН СССР, 1984. 196 с.

Соколов И.А., Конюшков Д.Е., Наумов Е.М., Ананко Т.В., Якушева Т.Е. Глава 5. Почвенный криогенез /под ред. М.С. Симаковой, В.Д. Тонконогова // в кн. Почвообразовательные процессы. М.: Почвенный институт им В.В. Докучаева, 2006

С. 144-166.

Еловская, Л.Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 171 с.

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

Макеев О.В. Криология почв // Тезисы докладов V Всесоюзной конференции «Теория почвенного криогенеза» (6-10 февраля 1989 г., Пущино). Пущино: Научный центр биологических исследований АН СССР, 1989. С. 3-4.

Van Vliet-Lanoe B., Coward J.-P. Structures caused by repeated freezing and thawing in various loamy sediments: a comparison of active, fossil and experimental data // Earth surface processes and landforms. 1984. Vol. 9. P. 553-565.

ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ПОЧВ В ЦИКЛАХ ПРОМЕРЗАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ: КОМПЛЕКСНЫЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ И ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Толстыгин К.Д.[1,2] Герке К.М.[3] Романенко К.А[1]
[1] ФИЦ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева"
[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения
[3] ИФЗ РАН имени О.Ю. Шмидта
kirill.tolstygin@yandex.ru

Структура почвы и ее поровое пространство являются фундаментальной характеристикой, которая определяет набор физических, химических и биологических свойств почвы. Структура влияет на качество сельскохозяйственной почвы и играет центральную роль в таких процессах, как хранение и движение воды выщелачивание питательных веществ, газообразные выбросы и динамику углерода.

Различные циклические процессы, происходящие в почве, оказывают значительное влияние на ее структуру; одним из основных примеров таких циклических процессов является замораживание-оттаивание. Циклы промерзания-оттаивания влияют на структуру почвы, особенно на ее верхний слой, и они происходят во многих регионах мира, особенно в России. Например, в Московской области за зимний сезон происходит около 100-200 переходов через 0 °C. Это может привести к эрозии, истончению слоя почвы, снижению плодородия почвы и урожайности зерновых культур. Криогенные процессы вносят существенный вклад в протекание многих почвообразовательных процессов и появление определенных характеристик в сезонно-мерзлых или многолетнемерзлых почвах. К таким процессам относятся: выветривание и распад первичных минералов из-за раскалывающего действия льда и тонких пленок воды, разрушение почвенных агрегатов, образование пузырьковых пор и так далее. Помимо прочего, температурные скачки влияют на искусственные почвы (например, конструктозёмы городских территорий) и почвы, находящиеся под сельскохозяйственной обработкой, а именно эти почвы оказывают важнейшее влияние на продовольственную безопасность Российской федерации.

Циклы промерзания-оттаивания существенно влияют на динамику структуры порового пространства почвы, как напрямую, так и через косвенные процессы. Предыдущие исследования представили различные наблюдения и интерпретации относительно качественных и количественных изменений в структуре почвы, вызванных этими циклами. В этом исследовании мы используем передовые методы — регистрацию изображений, корреляционные функции и поросетевые модели, — применяемые к трехмерным изображениям компьютерной томографии почв с различным генезисом. Эти изображения были проанализированы в их насыщенном состоянии, а также после первого, пятого, десятого и двадцатого циклов замораживания-оттаивания. Используемые методы позволили провести комплексную оценку структурной динамики, сохранив при этом топологию порового пространства. Наши выводы подтверждают концепцию периодичности в эффектах циклов промерзания-оттаивания, выявляя как структурирующие, так и деструктурирующие эффекты. Кроме того, результаты подкрепляют предыдущие исследования, касающиеся влияния гранулометрического состава почвы и содержания органического углерода на устойчивость почвы к промерзанию-оттаиванию.

КРИОГЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДЗОЛООБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРЕРЫВИСТОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Чепурнова М.А. Матышак Г.В.
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
chepurnovama@my.msu.ru

Подзолы – интразональные почвы, широко распространенные во всем мире. Криогенез, наравне с другими факторами почвообразования, накладывает отпечаток на подзолообразование как на уровне морфологии, так и на уровне протекания элементарных почвенных процессов. Вопросы подзолообразования в условиях криолитозоны поднимались неоднократно, однако до сих пор остаются открытыми касательно не только распространения подзолов в криолитозоне, но и механизмов их формирования.

Целью исследования является изучить особенности подзолообразования в условиях прерывистой криолитозоны севера Западной Сибири. В задачи настоящей работы входит охарактеризовать приуроченность подзолов к различным типам криогенных экосистем, описать морфологические, химические и физические свойства почв, а также оценить влияние криогенных процессов разных уровней на развитие подзолообразования. Основной гипотезой исследования является предположение, что на исследуемой территории подзолообразование обусловлено, в первую очередь, вкладом разновременных и разномасштабных криогенных процессов.

Регион исследования располагается в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород (ММП) на северной границе северной тайги (Надымский район, ЯНАО). На исследуемой территории сформированы следующие типы экосистем: криогенные экосистемы бугров пучения и площадей пучения в пределах мерзлотно-болотного комплекса (МБК), а также палеокриогенные лесные экосистемы с бугристо-западинным рельефом (БЗР). Объектами исследования являются подзолы, широко распространенные во всех выделенных типах криогенных экосистем.

Нами описано широко представленное разнообразие почв альфегумусового отдела. Процессы подзолообразования активно развиты и в пределах гидроморфного МБК, и в лесных автоморфных палеокриогенных ландшафтах, несмотря на различия в функционировании выделенных экосистем. В пределах МБК признаки подзолообразования встречены в 13% точек обследования. Морфология подзолов МБК имеет выраженные характерные особенности: фрагментарность подзолистого горизонта, небольшая мощность (5,0±1,1 см), паутинчатость (спутанно-слоистая структура по Дюшофуру), криотурбированность. Морфологические особенности обусловлены протекающими современными криогенными процессами: пучением, морозобойным растрескиванием. В структуре почвенного покрова (СПП) МБК подзолы приурочены преимущественно к буграм пучения, их распространение не имеет упорядоченного характера. Подзолы в пределах лесных экосистем встречаются чаще (88% точек обследования), приурочены, как правило, к элементам палеокриогенного бугристо-западинного рельефа (западинами). В СПП подзолы встречаются упорядочено, по сетке БЗР. Яркой чертой подзолообразования в лесных экосистемах является языковатость подзолистого горизонта: мощность языков варьирует от 5 до 140 см, они характеризуются широким разнообразием морфологии. Формирование языков связано с палеокриогенными явлениями (псевдоморфозами) и современными криогенными процессам (морозобойным растрескиванием). По химическим характеристикам, подзолы МБК отличаются от лесных меньшими значениями кислотности (pH 4,6±0,1 и 4,9±0,1 соответственно), более высоким содержанием органического углерода в иллювиальных горизонтах (0,48 ± 0,13 и 0,14 ± 0,02% соответственно). Содержание оксалаторастворимого железа в иллювиальных горизонтах (BF) почв выделенных типов криогенных экосистем примерно одинаково: 5084±410 и 5632±82 мг/кг соответственно, распределение носит элювиально-иллювиальный характер.

Подзолообразование является характерным почвенным процессом в исследованных криогенных экосистемах севера Западной Сибири, широко представлено независимо от типа экосистемы. Процессы подзолообразования приобретают разную выраженность в зависимости от криогенных процессов, протекающих как в настоящее время, так и в прошлые эпохи. Основные различия в подзолообразовании в исследуемых экосистемах обусловлены криогенными процессами, перераспределяющими преимущественные потоки почвенных растворов. Перераспределение потоков активизируется на разных уровнях процессами пучения, морозобойным растрескиванием, криотурбациями, образованием псведоморфоз.

РЕЛИКТОВЫЙ КРИОГЕННЫЙ ГОРИЗОНТ В ПОДЗОЛАХ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: ПЕДОГЕНЕТИЧЕСКОЕ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Шейнкман В.С.[1], Седов С.Н.[1], Овчинников А. Ю.[2], Макшанов А. М. [2], Гравис А.Г.[1]
[1] Институт криосферы Земли, ФИЦ ТюмНЦ СО РАН, Тюмень,
[2] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН, Пущино.
vlad.sheinkman@mail.ru

Северная часть Западно-Сибирской низменности – особый регион, который в плане поиска плейстоценовых палеопочв долгое время считался территорией бесперспективной – мешали прежние, сложившиеся исторически и довольно устойчивые представлений о распространении в ее пределах в плейстоцене ледниковых покровов и морских трансгрессий, которые, с одной стороны, не должны были позволять сохраняться следам предшествовавшего педогенеза, а с другой – препятствовали его развитию уже под толщей льда или морской воды. Исходя из этого, почвоведы, разрабатывавшие представления о генезисе и эволюции почв тундровой и северо-таежной зон Западной Сибири полагали, что начало педогенеза было связано здесь с освобождением местности от соответствующих покровов – в первую очередь с исчезновением былого ледникового покрова. Иными словами, почвенный покров на данной территории должен был иметь голоценовый возраст, и вопрос о наличии плейстоценовых реликтовых признаков в существующих современных почвах, а тем более – о погребённых палеопочвах, в таком случае даже не ставился.

Масштаб оледенений Евразии в последние десятилетия был пересмотрен в сторону значительного сокращения его размеров, в том числе были обоснованы подходы, оперирующие отсутствием в рассматриваемом регионе ледниковых покровов (Шейнкман и др., 2017, 2020), что послужило стимулом для постановки и проведения авторами плановых работ по поиску, анализу и интерпретации плейстоценовых палеопочв на севере Западной Сибири (Sedov et al., 2024; Sheinkman et al., 2024). Как репрезентативная территория была взята область к югу от зоны низкотемпературных, с современными полигонально-жильными льдами (ПЖЛ), многолетнемерзлых пород (ММП) – между полярным кругом и широтным течением Средней Оби: здесь авторами были обнаружены несколько уровней позднеплейстоценового почвообразования.

Для исследования закономерностей формирования и эволюции современного почвенного покрова наиболее важны данные по самому молодому из палеопочвенных уровней плейстоцена – МИС2, сартанскому. Этот уровень располагается вблизи поверхности, фактически образуя нижнюю часть профиля дневных почв. На наш взгляд, именно с ним связаны криогенные признаки, которые ранее фиксировались для подзолов региона некоторыми исследователями (Матышак, 2009), не ставившими, однако, задачи выяснить хронологический, а также палеоэкологический контекст этих признаков. Авторами при проведении работ в исследуемом регионе был получен большой массив данных для данного почвенного уровня из объектов в обнажениях высоких речных террас, которые сложены МИС3, каргинским, аллювием, но кровля слагаемой им толщи в МИС2 была препарирована низкотемпературными мерзлотными и криопедогенными процессами, а во второй половине голоцена освоена современными альфегумусовыми почвам – подзолами и подбурами. Совокупность признаков этих данных отражает развитие особого криопедогенного горизонта (Sedov et al., 2024; Sheinkman et al., 2024) с реликтами криогидроморфных почв, ясно отслеживающихся на глубине около 1 м от поверхности в виде сизого, мощностью в несколько сантиметров, палеопочвенного горизонта с многочисленными ржавыми пятнами и разводами. Сизые тона палеопочвы связаны с оглеением, обусловленным избыточным увлажнением в былом сезонно-талом слое (СТС) при близком к поверхности залегании мерзлого водоупора.

Данные реликты криогидроморфных почв – остатки более мощной древней почвы, редуцированной воздействием иллювиального горизонта лежащих выше современных подзолов и подбуров, в которые была инкорпорирована ее верхняя часть. Изначально она формировалась на участках между ПЖЛ, рассекавшим в МИС2 рассматриваемую толщу, и под слоем альфегумусовых почв ее реликты оказываются мало заметны: они обеднены гумусом, их сизый оттенок нередко не отчетлив, а слои с палеопочвой порой трансформированы в ходе развития в деятельном слое криотурбаций. Тем не менее, хорошо выражены педоседименты данной реликтовой почвы в заполнении псевдоморфоз по ПЖЛ – это следствие оползания почвенного материала по стенкам тающих ПЖЛ и последующего его захоронения. Для субстрата этого заполнения характерна ясно выраженная глеевая пигментация, а по краю псевдоморфоз по ПЖЛ фиксируется ржаво-бурая кайма шириной 2–5 см. Пигментация тела псевдоморфоз связана как с дополнительным оглеением в условиях избыточного увлажнения на пространстве таявших ПЖЛ, так и с восстановительными процессами в исходных почвах, тогда как в обрамлении псевдоморфоз по ПЖЛ на мерзлом контакте

осаждались дающие бурую кайму гидроксиды железа, мобилизованного в восстановительной среде тела псевдоморфоз.

Кое-где в заполнении псевдоморфоз по ПЖЛ формируются и темноокрашенные морфоны – скопления гумусированного материала, образцы которого пригодны для ^{14}C-датирования, и по ним получены возраста, позволившие проследить ход заполнения псевдоморфоз в терминальную фазу МИС2, сартанского криохрона, и в начале голоцена. Подобная интерпретация базируется на том, что данные морфоны это фрагменты горизонтов почв, существовавших рядом с ПЖЛ на момент их оттаивания, и ^{14}C-даты по ним дают практически время окончания формирования палеопочв, близкое к началу соответствующих этапов таяния ПЖЛ.

Полученные данные показали, что в потепление, завершившее МИС2, ПЖЛ стали таять, но вмещающих их породы оставались мерзлыми практически до конца раннего голоцена, хотя и при более высокой, чем необходимо для развития ПЖЛ температуре – способствуя заполнению освобождаемого льдом пространства оползавшим в него с междужильных участков субстратом криогидроморфных почв в условиях тундровых и тундрово-болотных экосистем. Это отражено в спорово-пыльцевом спектре образцов из морфонов (Sedov et al., 2022), а также составом гумусовых веществ в них (Дергачева и др., 2024). В среднем и позднем голоцена рассматриваемая толща уже стала талой до большой глубины и, поэтому, была олсвоена альфегумусовыми почвами, для которых требовалась среда с активной аэрацией и свободным дренажом.

Таким образом, близкое к поверхности залегание МИС2 криопедогенного уровня создаёт парадоксальный набор диагностических горизонтов и признаков, когда элювиально-иллювиальные профили подзолов и подбуров подстилаются сильно оглеенным горизонтом. Следовательно, для избежания ошибок в генетической интерпретации и, соответственно, в рекомендациях по использованию почв региона, требуется раздельная диагностика современных и реликтовых признаков. Тем более что во многих случаях реликтовые криогенные структуры оказывают влияние на развитие голоценового подзолообразования, когда над псевдоморфозами по ПЖЛ формируются карманы как элювиального, так и иллювиального горизонтов подзолов.

Работа выполнена при поддержке программы по госзаданию FWRZ-2021-0005.

ПЕРВАЯ, НА ОСНОВЕ ОТРАЖЕНИЯ ВЗАМОДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОВ КРИОЛИТОГЕНЕЗА И КРИОПЕДОГЕНЕЗА, ПАЛЕОКРИОЛОГИЧЕСКАЯ ЛЕТОПИСЬ ПОЗДНЕГО КВАРТЕРА НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Шейнкман В.С., Седов С.Н.,
Институт криосферы Земли, ФИЦ ТюмНЦ СО РАН, Тюмень,
vlad.sheinkman@mail.ru

Поздний квартер сопряжен с современностью, и его ход, представительно отражая события плейстоцена, нередко кладется, посредством создания различных палеокриологичеких летописей, в основу прогностических трендов. В арктической зоне Западной Сибири такого рода полновесные архивы получены по ярусным полигонально-жильных льдам (ПЖЛ) – путем учета содержащихся во льдах изотопов и включений органики (Васильчук и др., 2000; Стрелецкая и др., 2015). На юге Западной Сибири для создания подобных летописей задействованы лессовые серии (Зыкина, Зыкин, 2012) и анализ памяти содержащихся в них палеопочв (Таргульян, Бронникова, 2019). Но зона Субарктики к югу от полярного круга в Западной Сибири оставалась в этом плане мало освещенной. Отмеченные подходы расценивались здесь как нереальные: ПЖЛ, наиболее емкие носители палеокриологических данных, в этой зоне отсутствуют и в отношении палеопочв считалось, что они не встречаются в ней, а другие источники информации не обладают необходимым потенциалом.

Проводя исследования на данной территории, авторы выявили реальность построения для нее палеокриологической летописи нового типа – с учетом специфики многолетнемерзлых пород (ММП) и взаимодействия криогенеза и криопедогенеза. Проблема была в том, что ход криогенеза обычно воссоздается по оставляемым им в изучаемых породах следам, но по наиболее информативным в этом плане формам – следам былых ПЖЛ и связанных с ними явлений, которые к югу от современной области ПЖЛ должны в Субарктике были закономерно иметь место на предыдущих холодных этапах, в литературе имелись лишь редкие данные с разрозненными, сделанными в середине прошлого века их описаниями (Дубиков, 2002). А поиски криогенных палеопочв здесь ранее вообще не велись. Главная причина – ранее существовавший стереотип о покрытии в прошлом значительной части региона ледниковым щитом, под которыми все эти явления не должны были развиваться.

С учетом малой влагообеспеченности региона многие палеокриологические модели показывают его ныне, как минимум в позднем квартере, свободным от покрова льда (Svendsen et al., 2014; Möller et al., 2019), обоснована и концепция об отсутствии здесь покровных ледников вообще (Шейнкман и др., 2017; 2020). Из этого следовало: здесь на свободном ото льда пространстве на холодных этапах плейстоцена должны были возникать условия для становления криогенеза и криопедогенеза, подчиненные единым закономерностям развития холодных ландшафтов. Такой посыл послужил стимулом для постановки авторами работ по выяснению былого взаимодействия в толщах изучаемых отложений процессов криогенеза и педогенеза и выявлению особых криопедогенных комплексов (КПК), в следах развития которых будет отражена, дополняя друг друга, зашифрованная и в строении криогенных структур, и в памяти связанных с ними криогенных палеопочв, емкая палеокриологическая информация.

Представляет такой КПК, с одной стороны, набор характерных криогенных образований, которые могут полноценно служить индикаторами определенных черт былого промерзания горных пород: прежде всего наиболее ярко выраженные формы, такие, как псевдоморфозы по ПЖЛ, изначально-грунтовые жилы (ИГЖ) и различные криотурбации. С другой стороны, авторы в рассматриваемой зоне выявили, что с палеокриогенными структурами тесно связаны криогенные, впервые обнаруженные ими палеопочвы, в памяти которых заложена емкая информации о среде, в которой они были развиты. Это криогидроморфные почвы, выделяющиеся в данном случае тем, что они формировались на мерзлом базисе былого сезонно-талого слоя (СТС) – ясно идентифицируя положение этого базиса, реликты таких почв неплохо распознаются на пространстве между жильными криогенными формами.

В отсутствие ледниковых покровов выполнялась равнина в данной зоне промерзавшим в холодные эпохи аллювием, позднеплейстоценовая толща которого, датированная авторами ясно просматривается в разрезах речных террас средней высоты (10–20 м). В ней выделены КПК двух типов, отражающих большей и меньшей силы промерзание горных пород. КПК, созданный в МИС2, сартанский, самый холодный криохрон, расположен вблизи поверхности. Он характеризует наложение сильного промерзания на верхние слои МИС3, каргинского, аллювия, когда они были рассечены эпигенетическими ПЖЛ высотой 3–4 м, а на междужильном пространстве на мерзлом базисе СТС образовались обедненные криогидроморфные почвы. Потепление в терминальную фазу МИС2 и в начале голоцена обусловило таяние ПЖЛ при температуре выше нужной для их развития,

но достаточной для сохранения ММП, вмещавших ПЖЛ, что сказалось в специфическом заполнении наследующих ПЖЛ псевдоморфоз материалом оползающих с междужильного пространства по стенкам тающих льдов криогидроморфных почв. (Позднее в данной толще формировались уже посткриогенные структуры). КПК подобного типа хорошо выражен на территории междуречья Надым-Таз, он отчетливо маркирует соответствующие слои, и ему было дано название Надым-Тазовского криопедогенного горизонта.

КПК в толще МИС3, каргинского, аллювия ниже слоев, препарированных в ходе МИС2, сартанского криохрона, формировались при температуре ММП, не дающей возможность развития ПЖЛ, но обеспечивающей неглубокое залегание СТС и проявление ИГЖ и криотурбаций Все эти явления возникали в синкриогенных условиях, встречаются по всей данной толще, но лучше выражены в ее верхних слоях, отложенных на фоне усиления промерзания на этапе приближения к МИС2 криохрону. Реликты маломощных криогидроморфных палеопочв, но более богатых гумусом, чем отмеченные МИС2 почвы, лучше всего выражены именно в этих слоях, фиксируя меняющееся положение базиса былого СТС, на котором они формировались.

Более древние КПК обнаруживаются в теле высоких террас и связаны с ходом формирования датированных отложений МИС4 криохрона. Ясно фиксируется такой КПК, например, в верховьях р. Вах в теле 35-м террасы на глубине около 20 м от поверхности. В этом КПК также отражены следы былых ПЖЛ в виде псевдоморфоз по ним высотой около 3 м, окаймление которых тоже сопряжено с криогидроморфной почвой, залегавшей на мерзлом основании былого СТС. Характерно, что ниже по разрезу фиксируется ~1 м лесной педокомплекс, сформированный в казанцевский МИС5, термохрон: он отделяет вышележащие холодные комплексы. Псевдоморфозы по ПЖЛ, сформировавшихся в МИС4, врезаются в МИС5 казанцевский педокомплекс

В целом полученные результаты делают возможным, опираясь на чередование горизонтов, генерируемых в формате “тепло – холод”, создать, по крайней мере, схематически, для субарктической зоны Западной Сибири первую, как отражение взаимодействия процессов криолитогенеза и криопедогенеза, палеокриологическую летопись позднего квартера. Ее основные маркеры: 1) сформированный в криохрон МИС4, сменивший термохрон МИС5, КПК со следами былых ПЖЛ, сопряженных с криогидроморфными палеопочвами; 2) серия КПК в синкриогенном МИС3 аллювии с ИГЖ и криотрубациями и чередованием криогидроморфных палеопочв, относительно богатых гумусом; 3) Надым-Тазовский МИС2 КПК со следами эпигенетических ПЖЛ, сопряженных с обедненными криогидроморфными палеопочвами.

Работа выполнена при поддержке программы по госзаданию FWRZ-2021-0005

8. ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ КРИОЛИТОЗОНЫ. КРИОСФЕРА КАК ЭКОСИСТЕМА

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ПОЧВЕННЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД СОПРЯЖЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Гончарова О.Ю.[1], Тимофеева М.В.[2], Матышак Г.В.[1]
[1] МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
[2] ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Москва
goncharovaoy@my.msu.ru

Современные исследования доказывают необходимость включения процессов водной миграции соединений углерода в региональные и глобальные модели углеродного обмена. Величины (доля) данной статьи баланса в настоящее время носит оценочный характер. Цифры данной статьи хоть и являются небольшими, но потери углерода посредством водной миграции – устойчивая, постоянная отрицательная статья, которая при околонулевом углеродном балансе экосистемы может стать решающей в признании данной экосистемы стоком или источником углерода. Уникальность района исследования – севера Западной Сибири, обусловлена ее расположением на южном пределе распространения многолетнемерзлых пород, в экотонной зоне на границе типичных таежных и тундровых ландшафтов. Регион является естественным полигоном для мониторинга процессов, связанных с быстрыми климатическими изменениями и деградацией мерзлоты.

Исследования проведены для поверхностных вод (река, термокарстовые озера, лесные озера) и вод гидроморфных экосистем (болотных, надмерзлотных, грядово-мочажинного комплекса и других).

Минимальные величины содержания растворенного Сорг характерны для речных вод и вод лесных озер (3-6 мг/л), максимальные для почвенных надмерзлотных вод (до 130 мг/л). Промежуточное положение занимают болотные воды, воды термокарстовых озер, «подпертых» вод (перекрытие естественного стока трубой газопровода) и вод грядово-мочажинного комплекса (10-40 мг/л). Содержание Сорг значимо положительно коррелирует с содержанием растворенного неорганического углерода, представленного в основном CO_2. С глубиной концентрация Сорг в озерах увеличивается в 4-5 раз, в болотных водах незначительно. Запас Сорг в болотных и озерных водах составляет 10-15 г/м^2 (до глубины 50-70 см). В озерах запас углерода органических соединений в 2-5 раз выше, чем неорганических, а в болотных водах запас неорганических форм углерода может превышать запас органических в несколько раз.

Для всего разнообразия вод были получены спектрофотометрические характеристики. Параметр SUVA254, используемый для оценки содержания ароматических фрагментов в органическом веществе, увеличивается в ряду геохимически сопряженных гидроморфных экосистем: олиготрофное болото => грядово-мочажинное болото => подпертые воды => термокарстовые озера => река. Можно предположить, что по мере перемещения органического вещества от олиготрофного болота происходит постепенная его минерализация, уменьшение содержания легкогидролизуемых и доступных микроорганизмам фрагментов, в то время как молекулы с повышенным содержанием ароматических компонентов более устойчивы и способны дольше по времени сохраняться и транспортироваться на большие расстояния. Величины поглощения при определенных длинах волн значимо коррелируют с концентрацией в водах Сорг, причем коэффициент корреляции уменьшается по мере увеличения длины волны.

В ходе модельного лабораторного эксперимента было показано, что степень разложенности торфа и гидрологические условия территории определяют величины выноса соединений углерода с водами из почв плоскобугристых торфяников. Удельно большее количество растворенного Сорг выносится из менее разложившихся торфов, но суммарный вынос из объема торфа для среднеразложенного выше в 2.5 раза. Фактором, который может способствовать уменьшению общего выноса органического вещества за пределы профиля в сопряженные воды выступает наличие минерального грунта под торфяными горизонтами. Учитывая тенденции к увеличению количества осадков и повышению температуры воздуха для территории исследования, стоит ожидать увеличения мощности деятельного слоя на мерзлых торфяниках и увеличения экспорта соединений органического углерода за счет вовлечения мерзлых торфяных слоев. Однако оттаивание мерзлоты может вскрыть минеральные горизонты, способные к сорбции органического вещества.

В серии экспериментов было показано, что органическое вещество вод из озер, болотных вод и других практически не подвержено биодеструкции даже при оптимальных температурах. Слабая биодеградация органического вещества была зафиксирована для непосредственных вытяжек из торфов и лишайникового очеса. Существенная деструкция (50% за месяц инкубации) обнаружена для органического вещества мерзлых образцов торфа. Анализ основных типов вод на содержание полисахаридов (основная фракция лабильного пула углерода) подтвердил полученные данные. Можно заключить, что растворенное органическое вещество аквальных (озера) и гидроморфных (болота) экосистем региона характеризуется высокой устойчивостью к биодеструкции. Эти данные подтверждаются спектрофотометрическими характеристиками вод. Можно предположить, что основные процессы деструкции растворенного органического вещества происходят непосредственно в почве торфяников или в краевых частях болот на контакте с торфяниками. Именно в этих местах фиксировались максимальные концентрации Сорг в болотных водах, концентрация и эмиссия CO_2.

ESTIMATION OF ABOVE-AND BELOW-GROUND ECOSYSTEM PARAMETERS FOR THE DVM-DOS-TEM MODEL

Elchin Jafarov[1], Helene Genet[2], Brendan Rogers[1], Valeria Briones[1], Andrew Mullen[1], Trevor Smith[1] Tobey Carman[2], Ruth Rutter[2], Joy Clien[2], Joshua Randy[1], Christina Schaedel[1], Benjamin Maglio[2], Chu-Chun Chang[1], Velimir(Monti) Vesselinov[3], DogukanTeber[1], Sue Natali[1]

[1] Woodwell Climate Research Center, Falmouth, MA

[2] University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, AK

[3] Envi Traces LLC, Santa Fe, NM

ejafarov@woodwellclimate.org

The Arctic is warming rapidly, causing permafrost to thaw, which impacts the global climate. Understanding the variety of vegetation and soil in this region is crucial because these factors influence the carbon and nutrient cycles, energy balance, and the ecosystem's vulnerability to changes. More field studies are now providing data that help improve models predicting carbon cycling in permafrost areas. To make these models accurate, it's important to calibrate them using data from various sites with different types of vegetation and soil.

In this study we show methods used for model tuning in the ecosystem model used for modeling carbon fluxes from permafrost. We use advanced tools to automate and enhance the tuning process, adjusting model parameters to match observed data on carbon and nitrogen in the soil and plants. The study highlights our methods, discusses the relationship between model parameters and observed data, and examines the accuracy of our calibrated models. It also addresses the benefits and challenges of our approach and the overall difficulties of model calibration in these regions.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВ И ПОЧВОПОДОБНЫХ ТЕЛ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Д.А. Никитин [1], Л.В. Лысак[2], М.В. Корнейкова[3], Н.С. Мергелов[4], А.В. Долгих[4], А.С. Добрянский[4], А.В. Почикалов[4], Э.П. Зазовская[4], С.В. Горячкин[4]

[1] *ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева», 119017, Москва*

[2] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет Почвоведения, 119991, Москва*

[3] *Российский университет дружбы народов, Москва*

[4]*Институт географии РАН, 119017, Москва.*

e-mail: dimnik90@mail.ru

Изучение полярных регионов приобретает все большую актуальность ввиду чрезвычайно быстрого потепления и «позеленения» (увеличение площади растительного покрова) по сравнению с другими территориями Земли. Это приводит к повышению биологической активности (БА) почв/почвоподобных тел (ППТ), что может привести к усилению эмиссии парниковых газов. Однако данных о пространственно-временном распределении количественных показателей БА почв/ППТ явно недостаточно. Мало изучены состав и структура микробиома почв/ППТ Арктики, а также эколого-трофические особенности бактерий, архей и грибов этого региона. Получение информация о БА и составе микробиома почв/ППТ позволит охарактеризовать специфику почвообразования в Арктики и прогнозировать направленность эволюции почв в условиях изменяющегося климата. Изучение функционирования микробиома почв/ППТ Арктики имеет важное государственное значение, поскольку освоение и развитие Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) стоит в настоящее время в числе стратегических задач и национальных интересов России.

Цель работы – провести комплексное исследование БА почв/ППТ для оценки вклада микроорганизмов в экологические функции почв Арктической зоны Российской Федерации (Земля Франца-Иосифа, Новая Земля, полуострова Рыбачий, Кольский и Ямал, Большеземельская тундра, Полярный Урал, Таймыр) и архипелага Шпицберген.

БА почв/ППТ (базальное дыхание, субстрат-индуцированное дыхание, активность азотфиксации, денитрификации и метаногенеза) определяли газовым хроматографом «Кристалл 5000.2». Почвенное дыхание измеряли прямоточным методом закрытых камер с помощью портативного инфракрасного CO_2-газоанализатора AZ 77532. Биомассу микроорганизмов определяли методом люминесцентной микроскопии. Экстракцию тотальной ДНК микроорганизмов из почв/ППТ проводили набором «Power Soil DNA Isolation Kit». Количественную полимеразную цепную реакцию в реальном времени (ПЦР реал тайм) осуществляли на амплификаторе Real-Time CFX96 Touch. Высокопроизводительное секвенирование (метабаркодинг) Next Generation Sequencing проведено на платформе Illumina MiSeq. Численность и таксономическое разнообразие культивируемых микроорганизмов осуществляли с помощью метода микробиологического посева. Антибиотическую активность выявляли методом диффузии ингибиторов роста в питательную среду, экстракцией антибиотиков этилацетатом и бутанолом. Эстеразную активность штаммов определяли с помощью флуориметра по концентрации продукта гидролиза красителя флуорисцеина диацетата. Активность внеклеточных целлюлаз у штаммов оценивали методом гидролиза карбоксиметилцеллюлозы с фотометрическим определением продукта реакции. Активность внеклеточных фенолоксидаз лакказ и пероксидаз выявляли фотометрической реакцией с 2,2'-азино-бис-3-этилбензотиазолин-6-сульфоновой кислотой.

Характерной особенностью почв/ППТ АЗРФ является низкая БА, все параметры которой резко возрастают с севера на юг и с запада на восток, но уменьшаются вниз по профилю. Антропогенное воздействие повышает почвенного дыхание, однако снижает другие параметры БА почв/ППТ АЗРФ. БА супрагляциальных ППТ зависит от их положения на леднике и максимальна в супрагляциальной зоне. Главными лимитирующими факторами развития почв/ППТ и их БА в Высокой Арктике является покровное оледенение суши, обуславливающее низкую степень доступности жидкой воды и уровень сомкнутости растительного покрова.

Специфическими особенностями структурно-функциональной организации сообществ микроорганизмов почв/ППТ АЗРФ являются: максимальное развитие микроорганизмов в поверхностных органогенных горизонтах; небольшое количество доминантов; преобладание психрофильных/психротолерантных грибов и бактерий; доминирование мицелиальных форм микроорганизмов в терригенных, а одноклеточных – в субаквальных биотопах; высокое обилие диморфных грибов; доминирование отдела Basidiomycota грибов.

Впервые оценены количественные показатели микробиома: структура микробной биомассы, численность копий рибосомальных генов ITS рРНК грибов и генов 16S рРНК архей и бактерий,

количество функциональных генов цикла азота (*nif*H, *amo*A, *nir*K) и деградации нефтепродуктов (*alk*B). Количественные показатели микробиома почв/ППТ АЗРФ снижаются вниз по почвенным профилям, положительно коррелируют с содержанием органического углерода и азота почв/ППТ и уровнем сомкнутости растительного покрова.

Для ландшафтов АЗРФ с обильным растительным покровом, высоким содержанием органического углерода и азота в почве/ППТ характерна максимальная БА и малое количество родов-доминантов типичных для холодных экосистем (*Antarctomyces, Cadophora, Geomyces, Glaciozyma, Goffeauzyma, Hyphozyma, Thelebolus*). Напротив, для ландшафтов пустошей с низким содержанием питательных элементов БА почв/ППТ минимальна, велико количество рудеральных родов характерных для регионов с умеренным климатом (*Aspergillus, Cladosporium, Clonostachys, Mortierella, Mucor, Penicillium*).

Доминирующими таксонами почв АЗРФ для сухих биотопов с растительным покровом являются бактерии родов *Alcaligenes, Azotobacter, Comamonas, Cytophaga, Myxococcus, Polyangium, Pseudomonas, Rhizobium, Sporocytophaga, Xanthobacter* и *Xanthomonas*, микромицеты родов *Phoma, Thelebolus, Penicillium, Rhodotorula*; для сухих биотопов без растений – бактерии родов *Arthrobacter, Clostridium* и *Pseudomonas*, микромицеты родов *Cadophora, Cladosporium, Cladophialophora, Phialophora, Pseudogymnoascus* и *Sarocladium*. Доминанты субаквальных биотопов - бактерии родов *Bacillus, Cytophaga, Myxococcus* и *Polyangium*, микромицеты родов *Antarctomyces, Hyphozyma, Goffeauzyma, Phoma, Thelebolus*.

При помощи метода метабаркодинга (секвенирование гена 16S рРНК) показано, что в почвах и СПТ западной части АЗРФ с наиболее суровым климатом (пустоши Земли Франца-Иосифа и Новой Земли) доминируют бактерии филума Proteobacteria, а в локациях с менее суровыми условиями (тундры полуострова Рыбачий и Большеземельской тундры) – бактерии филумов Actinobacteria и Acidobacteria. Доминирование бактерии филума Nitrospirae и архей *Ferroplsma* в отдельных локусах свидетельствует об протекании процессов нитрификации (засоление, выщелачивание) и трансформации железа (глееобразование, железисто-иллювиальный процесс, оруденение).

У выделенных штаммов микромицетов и актиномицетов оценена способность к продукции ферментов (гидролазы и оксидазы) и антибиотиков. Более 75% штаммов обладают умеренной бактерицидной активностью, а более 30% штаммов фунгицидной активностью. Созданная коллекция штаммов с высокой антибиотической и ферментативной активностью может быть использована для решения задач в области биотехнологии.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о важной роли микроорганизмов в процессах почвообразования при частичной или полной элиминации ризосферы в Арктике. Оценка БА почв/ППТ АЗРФ позволит получить информацию о вкладе микроорганизмов в секвестрацию органического углерода, что поможет построить более точные модели стабилизации почвенного органического вещества в почве, что является важным условием климатической безопасности в полярных регионах России.

Исследования выполнены в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0010.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОРФА ПЛОСКО- И КРУПНОБУГРИСТЫХ ТОРФЯНИКОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ

Прокушкин А.С.[1,2], Новенко Е.Ю.[2]
[1] Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск
[2] Институт географии РАН, Москва
prokushkin@ksc.krasn.ru

Мерзлотные бугристые болота по своей площади занимают 14.6 % всех заболоченных территорий России и содержат огромный пул связанного углерода. В настоящее время, несмотря на наличие большого количества сведений о свойствах бугристых болот, теоретические и методологические аспекты проблем их формирования остаются дискуссионными. Необходим комплексный анализ генезиса и современного состояния почвенно-геокриологического комплекса бугристых болот на разных уровнях их организации – от растительного и почвенного покрова до молекулярного уровня, раскрывающего специфику строения и формирования органического вещества торфа. В связи с этим, такие геохимические свойства торфа как элементный (органический углерод и азот, соотношение между ними) и изотопный состав, отражающие изменения в растительности и степени гумификации (трансформации и минерализации) растительных остатков, широко используются в качестве индикаторов климатических изменений, в том числе, мерзлотных процессов – ее деградации и/или аградации. Цель настоящей работы заключается в реконструкции изменений ландшафтов и климата севера Центральной Сибири (Красноярский край) по данным изотопно-геохимического анализа торфа болотных отложений плоско- и крупнобугристых торфяников криолитозоны с высоким временным разрешением.

В качестве объектов исследования служили плоско- и крупнобугристые торфяники трех модельных территорий, расположенных в Центральной Сибири: «Игарка», «Тура» и «Ванавара». Интервал отбора проб торфяных залежей составлял 1,0-2,5 см, с увеличением шага отбора до 5 см в льдистых слоях. Определение содержания C и N, их отношения (C : N), а также соотношения их стабильных изотопов (^{13}C:^{12}C, ^{15}N:^{14}N) в отобранных образцах осуществлялось с помощью Vario Isotope Cube (Elementer) с изотопным масс-спектрометром Isoprime 100 IRMS (Isoprime Ltd., UK).

На начальных этапах формирования обоих типов мерзлых болот наблюдаются сходные характеристики органического вещества торфа (включая наиболее «молодую» залежь «Малая Гравийка») (рис. 1), что говорит об одинаковых исходных условиях начала торфонакопления и протекания процессов трансформации растительных остатков. Наибольшие различия выявлены в слое возрастом от 6000 до 3500 лет ВР (ледовое ядро), для которого характерна «консервация» органического вещества в крупнобугристых торфяниках. В верхних горизонтах у обоих типов мерзлых болот (за исключением мочажины болота «Горное»), наблюдаются повышенные значения $\delta^{15}N$, что свидетельствует об увеличении скоростей минерализации органического вещества в сезонно-талом слое. Следует подчеркнуть в этом контексте, что периодические пожары и эрозия бугров пучения ведут к потерям верхних горизонтов торфа и, соответственно, перехода более глубоких слоев торфяной залежи, т.е. ранее законсервированного мерзлотой ОВ, в талое состояние, что обуславливает более глубокую его трансформацию, что затрудняет реконструкцию палеоусловий. Так, на примере керна «Гравийка 4» с сохранившимся сфагновым ковром (т.е. без эрозионной потери верхних горизонтов торфа, наблюдается возрастание скоростей минерализации ОВ в результате формирования бугра пучения.

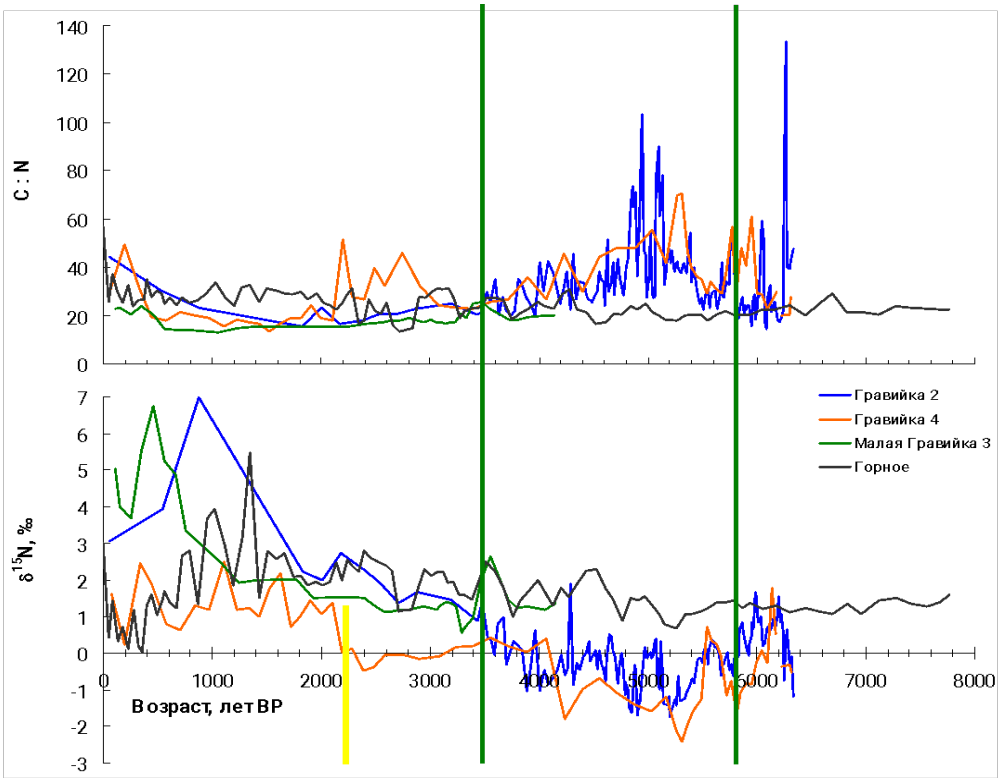


Рис. 1. Временная динамика отношения C:N (а) и δ15N (б) в крупно – («Гравийка 2» и «Гравийка 4» в Игарке) и плоскобугристых («Малая Гравийка 3» в Игарке и Горное болото» в Туре)) торфяниках. Желтой линией выделен предполагаемый переход в талое состояние на участке «Гравийка 4». Зелеными линиями ограничен период (диапазон), которому характерна «консервация» органического вещества в крупнобугристых торфяниках.

С учетом выявленной динамики изотопно-геохимического состава у двух типов торфяников, его периодические флуктуации во времени свидетельствуют о влиянии климатических переменных, как на состав растительного покрова, так и на скорости минерализационных процессов. При этом климатический сигнал в торфе плоскобугристых торфяников сглажен по сравнению с «консервируемым» органическим веществом крупнобугристых болот, что отражает более активно протекающие процессы трансформации растительных остатков.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ Соглашение № 075-15-2024-554 «Глобальные климатические вызовы на территории России: ретроспективный анализ. прогноз и механизмы адаптации».

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТАМИ НА СКОРОСТЬ РАЗЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ГЛУБИНУ ПРОТАИВАНИЯ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ КРИОЛИТОЗОНЫ

Розанова М.С., Семина О.Ю., Соловьева А.А.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Факультет почвоведения, Москва
rozanova_ms@mail.ru

Освоение северных территорий в середине 20 в. требовало создания временных объектов инфраструктуры, которые по мере строительства постоянных объектов (дороги, посадочные площадки для малой авиации и т.д.) прекращали использоваться. Так к началу 80-х годов 20 в. в Надымском районе Тюменской области в районе Надымского стационара Института Криосферы Земли РАН была обнаружена площадка со старым нефтяным загрязнением, ранее служившая посадочной площадкой для малой авиации на сильно заболоченной территории. Это поверхность бугра пучения, расположенного примерно в 600 м от стационара. На данный момент эта площадка не используется, она была заброшена в середине 70-х годов. Поверхность бугра носит следы присутствия человека, по периметру бугра брошены металлическая бочка, небольшие металлические емкости, тренога, лестница и.т.д. Визуально нарушения торфяного покрова не наблюдаются, следует отметить, что на поверхности бугра, по сравнению с соседними буграми, гораздо меньше кустарничков и деревьев, присутствуют несколько пятен-медальонов. Было высказано предположение о наличии возможных следов загрязнения вертолетным топливом и горюче-смазочными материалами поверхности торфяника, которые сохранились после прекращения использования бугра в качестве вертолетной площадки.

Проведенные предварительные исследования показали, что спустя почти 40 лет после прекращения эксплуатации этой территории загрязнение приповерхностного и более глубоких слоев хорошо диагностируется в лабораторных условиях. В естественных условиях в некоторых точках на поверхности бугра, служившей ранее вертолетной площадкой, присутствует слабо выраженный запах нефтепродуктов (НП), усиливающийся при высыхании (пересыхании) поверхности торфяника. Фоновые значения содержания НП в торфах для этой территории составляют 1087 мг/кг. Полученные данные показывают повсеместное превышение содержания НП по всей поверхности бывшей вертолетной площадки, при этом в некоторых местах коэффициент превышения содержания НП над фоновым значением составляет более 10-13 раз. Это может указывать на то, что в условиях местного климата при пониженной микробиологической деятельности, низких температурах нефтяное загрязнение может не только сохраняться долгое время, но проникать в более глубокие слои в ходе процессов промерзания-оттаивания. Об этом свидетельствует неравномерное распределение НП по профилю и их аккумуляция на глубине 30-70 см. Для оценки влияния загрязнения НП в естественных условиях был поставлен полевой эксперимент, основанный на учете потери массы торфа, закопанного на территории проводимых исследований. Были подготовлены пробы торфа (олиготрофного и переходного), ранее отобранные на этой территории, высушены, разложены в капроновые мешочки размером 10*10 см и взвешены. Для закладки мешочков с торфом выбраны две площадки: контрольная (фон) – незагрязненная НП, и обнаруженная ранее площадка (НП) со старым нефтяным загрязнением. Эксперимент проведен в 10-ти кратной повторности, длился год, далее пробы были выкопаны, высушены и взвешены. Полученные данные (Рис. 1), указывают на то, что максимальная потеря массы проб за год составила 6,9% на фоновой площадке и 2,3 % на нефтезагрязненной. Это говорит о замедлении скорости разложения органического материала на участках со старым нефтяным загрязнением.

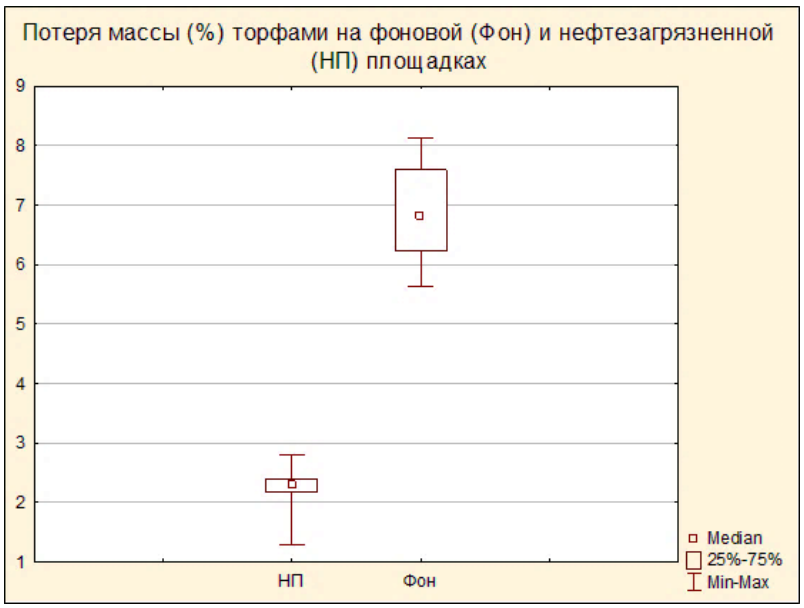


Рис. 1. Влияние загрязнения нефтепродуктами на скорость разложения органического материала

При измерении глубины протаивания на контрольной и загрязненной НП площадках было высказано предположение о более глубоком протаивании участков со старым загрязнением нефтепродуктами. Для ответа на этот вопрос загрязненный НП бугор (старая вертолетная площадка) и контрольный (фоновый участок) были разбиты на 11 квадратов размером примерно 2*2 м, в каждом из которых было сделаны по три измерения металлическим щупом глубины протаивания и температуры на глубине 10 см. Глубина протаивания на фоновых площадках не превышала 85 см, и среднем составила 64,5 см. На старой вертолетной площадке, загрязненной НП, глубина протаивания составила 111,4 см. Средние температуры на глубине 10 см также имеют определенные различия: температура почвы фоновой площадки составила 7,9^{o}C, а нефтезагрязненной площадки - почти на градус выше 8,7^{o}C, что может указывать на изменение теплообмена с окружающей средой участков, загрязненных НП.

ДИНАМИКА СОСТАВА ФЛУОРЕСЦИРУЮЩЕГО РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

Семенов П.Б.[1], Шатрова Е.В.[1,2], Киль А.О.[1], Левочкина О.В.[3], Стрелецкая И.Д.[4], Лейбман М.О.[3]
[1] ВНИИОкеангеология, 190121, Санкт-Петербург, Английский пр., 1, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, 199178, Санкт-Петербург, 10-я линия В.О., 33–35, Россия
[3] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия
[4] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия
shatliza@yandex.ru

Залежеобразующие подземные льды, среди которых наибольшее значение имеют пластовые (Стрелецкая и Лейбман, 2002) и полигонально-жильные, широко распространены в высокоширотной российской Арктике. При протаивании подземные льды, как и вмещающие их породы, служат источником высвобождающегося растворенного органического вещества (РОВ). В составе РОВ обнаруживаются наиболее биохимически лабильные органические соединения. Эта фракция РОВ, вероятно, образует особый пул в резервуаре валового органического углерода, наиболее быстро и эффективно включающийся в процесс биохимической минерализации, которая завершается продукцией парниковых газов (ПГ, преимущественно CO_2). В финале «каскада деградации» вещества, обусловленного переработкой органических соединений гетеротрофной микробиотой во внешней среде, формируется РОВ так называемого «универсального состава», представленное наиболее стабильными и малодоступными для микроорганизмов молекулами (Freeman et al., 2024). На примере побережья моря Бофорта показана существенная роль термокарстовых процессов и термоабразии берегов, сложенных мерзлыми породами, в эмиссии диоксида углерода прибрежными морскими водами в серии лабораторных инкубаций (Tansky et al., 2019). Выявлен достоверный стимулирующий эффект добавления в инкубационную смесь талой воды полигонально-жильных льдов на минерализацию растворенного органического углерода (РОУ) водных вытяжек мерзлых пород Едомы (Vonk et al., 2013, Vonk et al., 2015). Упомянутое явление, называемое прайминг-эффектом, представляет большой интерес для изучения цикла углерода локальных обстановок, испытывающих воздействие криогенной динамики (Textor et al., 2019). Все вышесказанное подчеркивает особую роль подземных льдов в качестве источника лабильного углерода в окружающую обстановку в Арктике. Получены данные, свидетельствующие о повышенной биохимической лабильности реликтового РОВ мерзлоты Сибирской Едомы. Экспериментально продемонстрирована минерализация до 34%±1% массы исходного РОУ образцов мерзлых пород в ходе 14-дневной инкубации в аэробных условиях (Vonk et al., 2013) и до 65% исходного содержания РОУ в ходе экспериментальной инкубации (61 день) расплавов пластового льда п-ова Ямал (Семенов и др., 2025).

Для анализа фракционного состава РОВ широко используется матричная 3D флуориметрия (EEM) с разделением флуоресцирующего РОВ на флуорофоры методом параллельного факторного анализа (PARAFAC) (Fellman et al., 2009; Hudson et al., 2007). В литературе описаны флуоресцентные маркеры лабильного РОВ, убывающие из раствора при минерализации РОВ в ходе инкубаций по определению биоразлагаемого РОУ (Vonk et al., 2013).

В этой работе была изучена динамика состава компонентов флуоресцирующего РОВ в ходе экспериментальной инкубации (61 день) в аэробных условиях трех образцов расплавов пластовых льдов (Вд1пл, Вд2пл, Вд3пл), отобранных на обнажениях НИС Васькины Дачи (по-в Ямал). Образцы расплавов были инокулированы активной аэробной микробиотой для выравнивания исходных условий инкубации. Для количественного анализа состава флуоресцирующего РОВ была выбрана ПАРАФАК модель для семи флуорофоров, которая успешно прошла валидацию (split half validation) в приложении EFC (https://www.nomresearch.cn/efc/indexEN.html). Компоненты Р1-Р6 по спектральным параметрам можно отнести к гуминовым и фульвокислотам, а компонент Р7 – к белковоподобному веществу (вероятно, смесь белков и свободных аминокислот), связанному с локальной микробной активностью. Три из семи выявленных компонентов (Р 1, 2, 7) обнаруживают высокую корреляцию с библиотечными компонентами базы Fluor DOM (mTCC>0.95) (He and Hur, 2015).

Изменение общего флуоресцирующего РОВ в ходе эксперимента (рассчитанного как разность значений суммы всех флуорофоров в первый и последний дни инкубации) составили (%): 11.29 (ВД1пл); 10.97 (ВД2пл) и 14.43 (ВД3пл). Наблюдаемый эффект обусловлен главным образом избирательной деградацией двух компонентов Р2 с максимумом флуоресценции на длинах волн (возбуждение/эмиссия) 325/460 нм и компонента Р7 с максимумом флуоресценции на 275/340 нм.

Резкое убывание белковоподобного (protein-like) компонента P7 (более чем на 50%) характерно для первых шести дней инкубации расплавов ВД1пл и ВД2пл, тогда как для образца ВД3пл аналогичное снижение содержания P7 (~50%) наблюдается на 26 день. При этом на долю P7 приходится лишь 5-7% валового содержания флуоресцирующего РОВ, что делает этот компонент качественным (но не количественным) индикатором биолабильного РОВ. Также примечательна устойчивость к биохимической трансформации гуминовых компонентов (P1, P3-P6), которые сохраняют неизменные концентрации в ходе инкубации. Вероятно, указанные компоненты, являющиеся продуктами деградации и трансформации растительной биомассы, в силу своей химической устойчивости могут служить эффективными маркерами палеогеографических условий образования льда, отражающими специфику вегетации в условиях промерзания (Pismeniuk et al., 2023).

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 23-27-00123).

Семенов П.Б., Киль А.О., Шатрова Е.В., Белова Н.Г., Левочкина О.В., Лейбман М.О., Облогов Г.Е., Хомутов А.В., Стрелецкая И.Д. Выделение диоксида углерода из оттаявших образцов подземного льда в условиях инкубационного эксперимента // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 1, с. 52–65. DOI: 10.15372/KZ20250105.

Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений Центрального Ямала // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 3, с. 15–24.

Freeman, E.C., Emilson, E.J.S., Dittmar, T. et al. Universal microbial reworking of dissolved organic matter along environmental gradients. Nat Commun, vol. 15, p. 187 (2024). https://doi.org/10.1038/s41467-023-44431-4.

Fellman J. B., Miller M. P., Cory R. M., D'Amore D. V., White D. Characterizing Dissolved Organic Matter Using PARAFAC Modeling of Fluorescence Spectroscopy: A Comparison of Two Models; Environmental Science & Technology; 2009, vol. 43(16): p. 6228-6234.

He, W.; Hur, J. Conservative behavior of fluorescence EEM-PARAFAC components in resin fractionation processes and its applicability for characterizing dissolved organic matter. Water Res. 2015, vol. 83, p. 217–226. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.044.

Pismeniuk A., Semenov P., Veremeeva A. et al. Geochemical features of ground ice from the Faddeevsky Peninsula eastern coast (Kotelny Island, East Siberian Arctic) as a key to understand paleoenvironmental conditions of its formation // Land, 2023, vol. 12, p. 324.

Hudson, N.; Baker, A.; Reynolds, D. Fluorescence analysis of dissolved organic matter in natural, waste and polluted waters - a review. Riv. Res. Applic., 2007, vol. 23, p. 631–649. doi: 10.1002/rra.1005.

Tanski G., Wagner D., Knoblauch C. et al. Rapid CO2 release from eroding permafrost in seawater // Geophys. Res. Lett., 2019, vol. 46, No. 20, p. 11244–11252.

Textor S.R., Wickland K.P., Podgorski D.C. et al. Dissolved organic carbon turnover in permafrost-influenced watersheds of Interior Alaska: molecular insights and the priming effect // Front. Earth Sci., 2019, vol. 7, p. 275.

Vonk J.E., Mann P.J., Davydov S. et al. High biolability of ancient permafrost carbon upon thaw // Geophys. Res. Lett., 2013, vol. 40, p. 2689–2693.

Vonk J.E., Tank S.E., Mann P.J. et al. Biodegradability of dissolved organic carbon in permafrost soils and aquatic systems: a meta-analysis // Biogeosciences, 2015, vol. 12, p. 6915–6930.

ФЕРМЕНТАТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ПОДЗОЛОВ КРИОЛИТОЗОНЫ

Семина О.Ю., Розанова М.С.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет Почвоведения, Москва
sem_olga02@mail.ru

Высокая биологическая активность является главным признаком «хорошего» биогеоценоза. Наибольший вклад в показатели биологической активности вносят микроорганизмы, которые являются редуцентами органических остатков, а также ферменты, которые являются продуктами метаболизма почвенной биоты. Для каждой почвы характерен сложный комплекс ферментов, называемый ферментативным пулом, формирующийся за счет микроорганизмов, экссудатов растений и почвенной фауны.

Ферменты класса оксиредуктаз, к которому относятся каталаза и дегидрогеназа, отвечают за ускорение окислительно-восстановительных реакций, принимающих участие в важных биохимических процессах, например, в разложении и синтезе гумусовых веществ. Гидролазы – это класс ферментов, разрушающий связи высокомолекулярных органических соединений и отвечающий за протекание реакции гидролиза. Одним из представителей класса гидролаз является инвертаза. Этот фермент осуществляет гидролиз сахарозы на глюкозу и фруктозу. К классу гидролаз относится уреаза, принимающая участие в регулировании азотного обмена в почве. Уреаза катализирует гидролитическое разложение мочевины на аммиак и диоксид углерода за счет разрыва связи между атомом азота и углерода в молекулах органического вещества.

Объектами исследования являются пробы почв (естественных подзолов и их антропогенно нарушенных вариантов), отобранные летом 2023 года на территориях, находящихся за Северным полярным кругом, на 85 км севернее г. Новый Уренгой; и непосредственно на территории г. Новый Уренгой.

В работе было задействовано 4 площадки, находившиеся под разной естественной растительностью. Преобладающая часть растительных ассоциаций характеризовалась доминированием мхов, лишайников, кустарников и травянистой растительности, одна встречались низкорослые виды древесной растительности.

Как в естественных подзолах, так и в антропогенно преобразованных абраземах происходит снижение активности каталазы и инвертазы с глубиной, что связано со снижением содержания Своз (углерода водорастворимых соединений) и Слгв (углерода лабильных гумусовых веществ), являющихся наиболее доступным субстратов для почвенных микроорганизмов.

Практически во всех горизонтах исследованных почв активность ферментов каталазы и инвертазы характеризуется как «очень бедная» и «бедная». Данные, полученные по активности уреазы, получились не однозначными. Несмотря на то, что все горизонты всех исследованных почв характеризуются «средней обогащенностью» этого фермента, распределение по профилям почв сильно различается и не подчиняется никакой зависимости.

Во всех вариантах отмечается одинаковая закономерность: по мере уменьшения вниз по профилю содержания Своз происходит уменьшение каталазной активности. В работах многих авторов было отмечено, что для преобладающего большинства почвенных ферментов содержание лабильных фракций органического вещества является определяющим.

На рисунке 1 показана зависимость содержания активности каталазы от Своз в верхних горизонтах исследованных почв. Коэффициент детерминации (R2) составляет 0,79, что говорит о тесной положительной связи между этими двумя показателями.

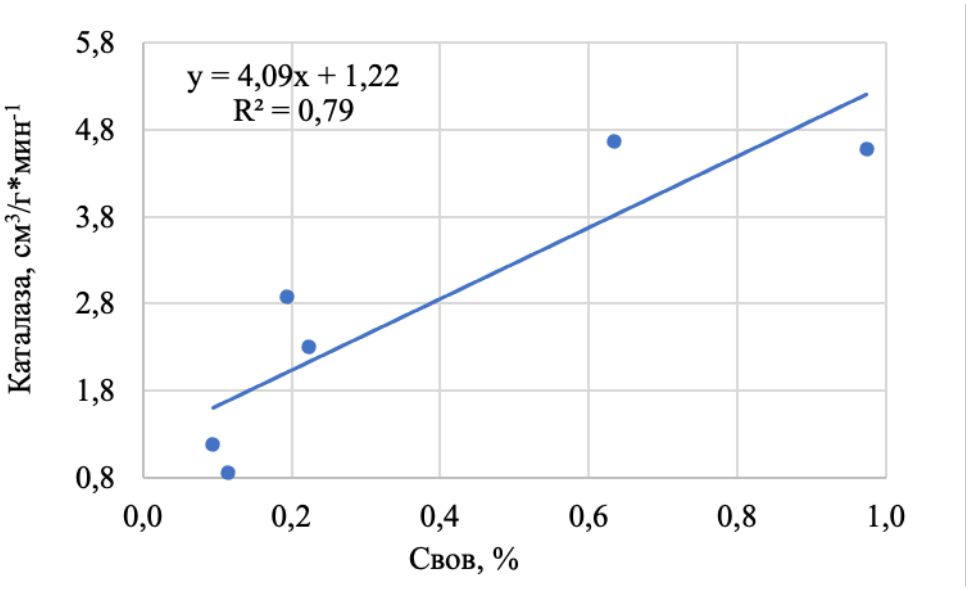


Рис. 1. Зависимость активности каталазы от содержания Свов в верхних горизонтах исследованных почв

Как известно, Свов – это фракция, преимущественно состоящая из углеводов. Инвертаза представляет собой фермент, который отвечает за гидролитическое разложение сахарозы и обеспечивает тем самым поступление в почву хорошо растворимых низкомолекулярных сахаров (глюкозы и фруктозы), которые служат источником питания и энергии для почвенных микроорганизмов. Тесной корреляции между активностью инвертазы и содержанием Свов получить не удалось, что скорее всего может быть связано с особенностями формирования исследованных почв, а также содержанием и составом Свов в исследованных почвах.

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам ООО «СеверПодводСтрой» - Лыхве С.В., Горбунову Ю.Н., Чупрову В.С. за участие в подготовке и осуществлении отбора материалов для исследований, сопровождение во время проведения полевых работ на объектах газотранспортной инфраструктуры на территории ЯНАО, а также за помощь в решении всех возникавших технических и бытовых вопросов. А также сотрудникам факультета почвоведения МГУ: Дёмину В.В., Завгородней Ю.А., Белову А.А., Смирновой И.Е., Прокофьевой Т.В. за консультации и помощь в выполнении исследований.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПОЧВ БУГРИСТЫХ ТОРФЯНИКОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА И ДЕГРАДАЦИИ МЕРЗЛОТЫ

Тимофеева М.В.[1], Гончарова О.Ю.[2], Матышак Г.В.[2]
[1] ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Москва
[2] МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
timofeeva_mv@esoil.ru

Наблюдаемые сегодня повсеместно изменения климата приводят к ряду неблагоприятных последствий. Неоспоримый интерес представляют процессы деградации многолетнемерзлых пород (ММП) и их влияние на параметры функционирования почв. Для отслеживания изменений мощности сезонноталого слоя (СТС) и глубины залегания ММП в долгосрочной перспективе существует международная программа мониторинга «активного слоя» почвы (Circumpolar Active Layer Monitoring – CALM). Контрольные площадки, заложенные в рамках этой программы, расположены в арктической и субарктической зонах. Суть подхода состоит в том, что на наиболее типичном участке какой-либо экосистемы разбивается сетка из 121 точки, в каждой из которых ежегодно проводятся комплексные исследования. Обязательным пунктом является фиксирование мощности СТС и глубины залегания ММП в период максимального оттаивания. Целью данной работы является оценка изменения геокриологических условий почв плоскобугристых торфяников и олиготрофного болота и параметров их функционирования за 10-летний период.

Исследование проводили в 2013 и 2024 гг. на мониторинговой площадке CALM R1, распложенной на территории полевого стационара «Надым» на севере Западной Сибири. Рассматриваемая мониторинговая площадка представляет собой участок торфяно-болотного комплекса размером 100 × 100 м, на который наложена сетка расположенных через каждые 10 м точек опробования. В пределах исследуемого комплекса расположено 2 типа контрастных экосистем: плоскобугристый торфяник (около 60% исследуемой площади) и олиготрофное болото. Почвенный покров участка торфяника представлен комбинациями мерзлотных почв – торфяно-криоземов (*Histic Oxyaquic Turbic Cryosol*), торфяно-глееземов (*Histic Reductaquic Cryosol*), глееземы криотурбированных (*Reductaquic Turbic Cryosol*), криоземов (*Oxyaquic Turbic Cryosol*). Почвы болота определены как торфяные олиготрофные типичные (*Fibric Histosol*). На каждой из точек проведены следующие измерения: мощность сезонно-талого слоя, температура и влажность верхнего 10-см слоя почвы, эмиссия CO_2 с поверхности почвы. Для характеристики участка также проведено описание форм микрорельефа и растительного покрова.

Установлено, что в 2013 году СТС более 2 м наблюдался только в 16% апробированных точек. В 2024 году лишь в двух точках едва удалось установить СТС на глубине около 2м. Эмиссия CO_2 с поверхности почв торфяника в 2024 в среднем в 1.5 раза выше по сравнению с 2013 годом и составляет 321±145 и 164±99 мгCO_2·м$^{-2}$·час$^{-1}$ соответственно. Эмиссия CO_2 почвами болота увеличилась за 10 лет в 1.6 раз – с 150±146 до 245±117 мгCO_2·м$^{-2}$·час$^{-1}$. Полученные на примере площадки CALM результаты подтверждаются исследованиями на других аналогичных экосистемах этой же территории. Например, плоскобугристый торфяник и окружающее его болото, находящиеся в ~ 700 м характеризуются сходной тенденцией в изменении глубины СТС и эмиссии CO_2 почвами. С 2017 по 2023 год мощность СТС увеличилась с 33 см до 51 см, эмиссия CO_2 почвами торфяника возросла в 1.5 раза, а эмиссия на болоте – в 5.8 раз, с 26 до 152±58 мгCO_2·м$^{-2}$·час$^{-1}$.

Деградация мерзлоты в зоне прерывистого распределения ММП в северной тайге Западной Сибири наблюдается еще с 80-х годов, но в последнее десятилетие приобретает все более крупные масштабы. При оттаивании ММП возрастает биологическая активность почв и усиливается минерализация почвенного органического вещества (ПОВ), что находит отражение в повышении эмиссии парниковых газов. Однако мы не можем однозначно утверждать, что при этом рассматриваемые экосистемы резко из стока углерода, каковыми классически считаются торфяники, станут его источником. Тем не менее деградация ММП на больших территориях может привести к перестройкам поверхностного и подземного стока вод, что способно глобально изменить гидрологическую сеть всего региона.

СУПРАГЛЯЦИАЛЬНЫЕ И ПОЧВОПОДОБНЫЕ СИСТЕМЫ КАРСТОВЫХ ПЕЩЕР ПИНЕЖЬЯ КАК ОБЪЕКТЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ

Турчинская С.М.,[1] Мергелов Н.С.,[1] Никитин Д.А.,[2] Долгих А.В.,[1] Зазовская Э.П.,[1,3] Горячкин С.В.[1]
[1] Институт географии РАН, Москва
[2] Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва
[3]Центр прикладных изотопных исследований, Университет штата Джорджия, Атенс, США
turchinskaya@igras.ru

Изучение объектов экстремального почвообразования в карстовых пещерах северных широт даёт представление о закономерностях формирования и функционирования биокосных систем в условиях значительного дефицита ресурсов (низкая температура, лимитированное количество вещества и энергии, частичное или полное отсутствие солнечного света).

Нами были найдены, описаны и изучены два объекта экстремального почвообразования в карстовых пещерах: супрагляциальные системы, формирующиеся на поверхности многолетних подземных наледей, которые до настоящего времени оставались слабо изученными. Эти системы демонстрируют признаки формирования почвоподобных тел на границе лёд–минеральная порода при участии биоты, что позволяет рассматривать их как модельные системы экстремального почвообразования (Горячкин и др., 2019; Горячкин, 2022); почвоподобные тела – солоиды (Горячкин и др., 2019), формирующиеся in situ во входной фотической части пещер под сообществами фотоавтотрофных организмов.

Супрагляциальные системы, формирующиеся на поверхности многолетних подземных наледей исследованы в карстовой пещере Большая Кулогорская (Пинежский район, Архангельская область). Были изучены макро- и мезоморфологические особенности супрагляциальных систем, отобраны образцы для микробиологических исследований и анализа изотопного состава углерода (δ13C, ‰) и азота (δ15N, ‰). Оценка биологической активности и структуры микробных сообществ проводилась методами ПЦР в реальном времени, проведены измерения дыхательной активности субстрата.

На поверхности многолетней наледи в дальней (афотической) зоне пещеры сформировались супрагляциальные почвоподобные тела, представленные комплексом мелкоземистого паводкового материала с гравитационными включениями гипсового и доломитового материала с потолка и стен пещеры. Морфология отложений обусловлена неровностями, что связано с микрорельефом наледи и движением талых вод на её поверхности, способствующих инситному выветриванию пород (гипса и доломита) и увлажнению субстрата, способствующему развитию жизни даже в условиях полной темноты. Максимальные значение биологической активности объектов в дальней темной зоне Большой Кулогорской пещеры зафиксированы в гипсовом и карбонатном мелкоземе, представленном микроагрегатами и гранулами с примесью паводкового ила и пыли на многолетней наледи. На этих участках дыхательная активность достигала 0.86 мкг CO2-C/г/ч, микробная биомасса по СИД изменялась от 196 (образец KU1) до 259 (образец KU2) мкг С/г субстрата. Изотопный анализ углерода и азота показал значительное варьирование δ13C: от -14.91‰ (KU1) до -25.21‰ (KU2) и δ15N: от 3.11‰ (KU1) до 2,79‰ (KU2), что коррелирует с количеством микробной биомассы в этих образцах. Изотопное фракционирование углерода и азота, а также соотношения CNmass (KU1) = 11.67, CNmass (KU2) = 7 отражают различия в источниках органического вещества (ОВ) и путях его трансформации. Преобладание бактерий и архей, по данным ПЦР-анализов, указывает на доминирование хемолитоавтотрофных сообществ, адаптированных к условиям отсутствия света, низких температур и ограниченного поступления ОВ. Биомасса грибов в супрагляциальных объектах пещер Пинеги была невысока (0.081 - 0.273 мгС/г субстрата), доля мицелия (активного компонента грибной биомассы) варьировала от 66 до 69%.

В отличие от супрагляциальных систем, развивающихся в афотических зонах пещеры, почвоподобные тела – солоиды, формирующиеся во входной фотической части, демонстрируют иные механизмы органо-минеральных взаимодействий и биогеохимических трансформаций. В условиях доступа солнечного света не происходит формирования многолетних наледей (сезонные циклы замерзания-оттаивания), что обеспечивает развитие фотоавтотрофных сообществ, с доминированием мхов, которые активно участвуют в процессах фиксации углерода и азота, способствуя биогенной коррозии горных пород, аккумуляции органического вещества и формированию почвоподобных тел. Изотопный состав углерода δ13C моховых сообществ значительно легче (около -32.44‰), чем органического вещества солоида под ним (около -26.04‰), что свидетельствует о накоплении и переработке растительного органического вещества. Изотопный состав азота δ15N также демонстрирует существенное фракционирование: от-5.49‰ в моховых

сообществах до -10.73‰ для солоида, что отражает эффективное вовлечение азота в процессы трансформации органического вещества и показывает активный круговорт в условиях фотической зоны пещеры.

Сравнение фотических и афотических систем пещеры демонстрирует два различных сценария экстремального почвообразования в карстовых пещерах северных широт. Афотические супрагляциальные системы развиваются при полном отсутствии солнечного света за счёт хемолитотрофных сообществ, что подтверждается более тяжёлыми значениями δ13C и меньшей биологической активностью. Напротив, фотические зоны стимулируют рост и активность сообществ фотоавтотрофов, которые могут включать и гетеротрофную компоненту, что определяет более лёгкий изотопный состав углерода и выраженное фракционирование азота, связанное с многоступенчатой переработкой органического вещества и активной деятельностью микробных организмов (Турчинская и др, 2022).

Таким образом, исследование почвоподобных систем пещеры Большая Кулогорская позволяет проследить влияние освещённости и типа трофических связей на формирование органо-минеральных комплексов в экстремальных условиях северных широт. Изотопные характеристики углерода и азота в солоидах и супрагляциальных образованиях демонстрируют различные пути биогеохимической эволюции, что важно для понимания механизмов экстремального почвообразования.

1. *Горячкин С.В., Мергелов Н.С., Таргульян В.О.* Генезис и география почв экстремальных условий: элементы теории и методические подходы // Почвоведение. 2019. №1. С. 5-19. 10.1134/S0032180X19010040
2. *Горячкин С.В.* География экстремальных почв и почвоподобных систем // Вестник РАН. 2022, том 92, №6, с.564-571. 10.31857/S0869587322060056
3. *Турчинская С.М., Семиколенных А.А., Мазина С.Е., Зазовская Э.П.* Изотопный состав углерода и азота компонентов подземных карстовых геосистем на примере экскурсионных пещер Предуралья и Кавказа // Известия РАН. Серия географическая. 2022. 86. №5, с. 715–730. 10.31857/S2587556622050132

ВЛИЯНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ И ЕЕ ДЕГРАДАЦИИ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ КРИОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Чернова В.А., Матышак Г.В.
Факультет Почвоведения, МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
barbara_che@mail.ru

Торфяные почвы представляют собой один из наиболее репрезентативных маркеров при изучении климатических изменений. Они являются крупным резервуаром углерода и содержат около 20% от общего количества этого элемента в почвах Земли. В условиях криолиотозоны органический материал законсервирован в мерзлом состоянии и характеризуется повышенной чувствительностью к изменениям климата, что при потеплении может привести к возникновению значительной добавочной эмиссии парниковых газов. В результате этого торфяники, формирующиеся в зоне многолетней мерзлоты, являются важным объектом при разработке моделей реакции криогенных экосистем на потепление.

Тем не менее, на данный момент возможный вклад многолетней мерзлоты и ее деградации в потоки углерода из торфяных почв криолитозоны остается неясным, в первую очередь, в результате недостаточности полевых данных.

Целью данной работы является изучение динамики биологической активности и свойств торфяных почв при деградации многолетней мерзлоты. Основной задачей была оценка отличий свойств торфа, находящегося в многолетнемерзлом состоянии от аналогичных образцов торфа из сезонно-талого слоя и динамики его свойств при оттаивании. Для решения поставленных задач были изучены лабильные параметры почв (базальное дыхание, микробный углерод, содержание лабильного органического вещества), а также ряд общих свойств (pH, зольность, степень разложения, Собщ, Nобщ) образцов торфяных почв из сезонно-талого слоя (СТС) и образцов, находившихся в многолетнемерзлом состоянии. Определение лабильных показателей проведено непосредственно после доставки образцов в лабораторию и оттаивания мерзлых образцов, а также через 5 месяцев после оттаивания.

Территория исследований расположена на севере Западной Сибири (Надымский район, Тюменская область, ЯНАО) на границе распространения северо-таежных и лесотундровых экосистем, в междуречье рек Хейгияха и Левая Хетта (65°20′ N, 72°55′E). Объектами исследования были наиболее типичные для района исследований почвы: торфяно-криоземы бугристых торфяников (О– Т–CR–С⊥), а также торфяно-олиготрофная мерзлотная почва бугра пучения (О– Т–ТТ⊥). СТС составлял 0,7 и 0,6 м. Переходный слой мощностью 20-30 см был представлен мерзлым высокольдистым торфом с выраженной криотекстурой. Многолетнемерзлые породы, представленные торфяным субстратом (ТТ) или песчаными отложениями (С), располагались на глубинах 1 и 0,8 м соответственно. Образцы для исследований (торф и минеральный субстрат из СТС и многолетнемерзлых отложений) были отобраны методом бурения в 3-х кратной повторности и перевезены в лабораторию, где хранились при 5℃ до начала экспериментов.

Установлено, что общие свойства образцов торфа и песчаного субстрата, развивающихся в СТС и в многолетнемерзлом состоянии в целом схожи. Максимальные отличия установлены для кислотности образцов, которая была достоверно меньше в мерзлых образцах (4,29+/-0,09 и 5,14+/-0,14, соответственно). Для лабильных параметров характерны существенно большие различия. Мерзлые образцы сразу после оттаивания характеризуются значительно более высоким содержанием водорастворимого углерода по сравнению с образцами из СТС (1055,02+/-94,57 мг/кг и 332,02 +/-203,84 мг/кг) и азота (115,78+/-6,70 мг/кг и 39,33+/-10,38 мг/кг), а также высоким содержанием Смик (369,06+/- 262,9641 мкг/г и 237,12+/-92,51 мкг/г). Базальное дыхание при этом достоверных отличий не имеет. После долгосрочного инкубирования образцов при 5℃ отмечается активизация биологической активности оттаявших образцов. Базальное дыхание увеличивается и достоверно отличается от БД образцов из СТС 3,53+/-1,21 мкг/г*ч и 2,22+/-0,61 мкг/г*ч, соответственно). Таким образом, можно констатировать значительное влияние нахождения почв в многолетнемерзлом состоянии на свойства субстрата (торфа). В целом происходит увеличение содержания лабильных параметров, которое со временем может приводить к активизации биологической активности почв и увеличивать эмиссионные потоки диоксида углерода при оттаивании многолетнемерзлых отложений.

КРИПТИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ДРЕВНИХ ИНФУЗОРИЙ *Paracolpoda steinii* В ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ АРКТИКИ

Шатилович А.В.[1,2], Кривина Е.С.[3], Быкова С.[4], Трибун М.[2]

[1] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований РАН», Пущино

[2] Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург

[3] Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К.Скрябина ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований РАН», Пущино

[4] Институт экологии Волжского бассейна РАН, филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарского ФИЦ РАН, Тольятти

nastya.shat@rambler.ru

В рамках изучения палеобиоты многолетнемёрзлых отложений восточной Арктики проведено сравнительное исследование филогенетического положения современных и ископаемых инфузорий ***Paracolpoda steinii*** (Ciliophora, Colpodidae)**. Эти** почвенные и пресноводные инфузории имеют всесветное распространение, которое обусловлено значительной экологической пластичностью и способностью к криптобиозу (образованию цист покоя). Для лучшего понимания эволюционной истории, структуры и криптического разнообразия рода *Paracolpoda*, проведен молекулярно-филогенетический анализ. В качестве генетического маркера использованы высоковариабельные внутренние транскрибируемые спейсеры ITS1 и ITS2. Цель работы – оценить геномное внутри- и межвидовое разнообразие современных и ископаемых кольпод, используя коллекцию штаммов, выделенных из современных почв и разновозрастных многолетнемерзлых отложений севера Якутии.

В исследовании использованы 9 клональных культур *Paracolpoda steinii*: 7 штаммов древних жизнеспособных инфузорий были изолированы из образцов многолетнемёрзлых разновозрастных отложений полярных и субполярных районов Якутии, погребённых почв и ископаемых нор; 2 штамма кольпод были получены из образцов современных тундровых криоземов и лесных почв Московской области. Длительность криптобиоза древних инфузорий равна возрасту многолетнемерзлых пород и, по данным радиоуглеродного анализа, составляет от нескольких тысяч в верхних слоях мерзлоты до 45 тысяч лет на глубине около 40 метров.

Для определения уровня внутри- и межвидовой изменчивости получены и проанализированы нуклеотидные последовательности генов 18S и 5.8S рРНК, включая ITS, оценены различия во вторичных структурах ITS2 и наличие компенсаторных замен (CBC), проведены морфологические и морфометрические исследования с использованием методов световой и электронной микроскопии.

Морфометрические исследования штаммов *Paracolpoda steinii* показали, что, несмотря на наличие статистически значимых различий между штаммами, они не формируют четко различимых групп. То есть, вследствие высокой фенотипической пластичности рода, морфометрические различия не отражают филогенетические связи между штаммами и не могут служить основанием для их различия на уровне фенотипа.

Анализ полноразмерных (около 1600 п.н.) последовательностей гена 18S рРНК, показал, что исследуемые штаммы колпоидных инфузорий составляют единые филогенетические кластеры с высоким уровнем сходства между современными и ископаемыми инфузориями. Генетические дистанции по гену 18S рРНК между близкородственными родами семейства *Colpodidae* не превышали 6%, а между штаммами *P.steinii* составили в среднем 0,7%. Для выявления скрытого внутривидового разнообразия кольпод был использован менее консервативный молекулярный маркер ITS1-5,8S-ITS2. Уровень внутривидовой вариабельности у *P.steinii* в этом фрагменте оказался довольно высоким и составил 2,7-6,4%, а генетические дистанции между близкородственными родами *Colpoda* и *Paracolpoda* находились в диапазоне 38-45%. На филогенетическом древе, построенном на основании этого маркера, род *Paracolpoda* выделяется в единый кластер, внутри которого исследуемые штаммы кольпод образуют 3 кластера с высоким уровнем поддержки.

Для более точного выявления генетических различий между штаммами применили CBC анализ. Ранее было показано, что компенсаторные замены (CBC) и различия во вторичной структуре ITS2 могут быть использованы для разграничения близкородственных видов инфузорий, однако, в настоящее время получены данные лишь для некоторых групп инфузорий и не во всех случаях применение метода было результативно.

Для применения CBC-подхода были получены последовательности и смоделированы вторичные структуры ITS2 для всех штаммов исследуемых кольпод. Длина спейсера ITS2 составляла 186-188 п.н. Вторичная структура ITS2 обладала признаками, характерными для общей модели, предложенной для эукариот: 3 неразветвленные шпильки (II - IV), пиримидин-пиримидиновый мисматч во II шпильке. Сравнительный анализ вторичной структуры ITS2 выявил наличие

компенсаторных замен (CBC) в консервативных регионах ITS2 (11 п.н. II шпильки и вся III шпилька). Как ранее показала Coleman (2009), наличие хотя бы одной CBC в консервативном регионе ITS2 приводит к репродуктивной изоляции и генетической дифференциации видов. Сравнительный CBC анализ позволил уточнить генетические различия между исследуемыми штаммами и разделить их на 3 группы, имеющие общие замены и генеративно изолированные друг от друга.

Филогенетический анализ в сочетании с изучением особенностей вторичной структуры ITS2 показал, что *P.steinii* представляет собой комплекс криптических, новых для науки видов. Критерий CBC выявил значительное внутривидовое разнообразие, что позволило построить гипотетическую последовательность эволюционных событий, приведших к разделению криптовидов. Таким образом, молекулярно-филогенетический анализ позволил уточнить современное положение и эволюционную историю *P.steinii* в позднем плейстоцене.

Работа выполнена по темам Госзаданий ИФХиБПП РАН (№ 122040500038-3), ЗИН РАН (№ 125012800894-6), ИБФМ РАН (FMRM-2022-0019), ИЭВБ РАН (№ 1024032600218-3-1.6.20).

Coleman, A. W. (2009). Is there a molecular key to the level of “biological species” in eukaryotes? A DNA guide. *Molecular phylogenetics and evolution*, *50*(1), 197-203.

МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БЫКОВСКОГО ПОЛУОСТРОВА РАЗЛИЧНОГО ВОЗРАСТА И ГЕНЕЗИСА

Шевченко А.Ю.[1], Спирина Е.В.[2], Тутукина М.Н.[1,3,4], Гельфанд М.С.[1], Абрамов А.А.[2]
[1] Сколковский институт науки и технологий
[2] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
[3]Институт биофизики клетки РАН
[4]Институт общей генетики имени Н. И. Вавилова РАН
shevch2009@yahoo.com

Тенденции в изменении климата являются глобальной экологической проблемой. Экосистемы вечной мерзлоты в этом плане являются наиболее уязвимой частью нашей планеты. Для оценки возможного отклика древних микробных популяций на климатические изменения, необходимо понимать, какие функциональные группы микроорганизмов могут быть вовлечены в реакции современных биогеохимических циклов и насколько эффективно будет задействован в этих процессах пул законсервированных внеклеточных ферментов. С этих позиций особенно интересным объектом является вечная мерзлота Быковского п-ова представленная син- и эпикриогенными отложениями различного возраста. Некогда в них активно проходили основные геохимические процессы, осуществляемые при участии микроорганизмов, а на сегодняшний день они являются хранилищем значительного пула палеомикроорганизмов, способных при таянии мерзлоты восстанавливать физиологическую активность, заново вовлекаться в биогеохимические процессы и проводить деструкцию законсервированных в мерзлоте запасов углерода. Цель данного исследования - охарактеризовать структуру древних микробных сообществ, оценить их функциональную значимость и метаболический потенциал на примере многолетнемерзлых отложений п-ова Быковский.

Для решения поставленных задач в работе использованы образцы из 15-метровой скважины, пробуренной на п-ове Быковский - части дельты Лены, расположенной в районе Тикси (Буорско-Хайская губа моря Лаптевых). Образцы представляли собой несколько геологических разрезов: современные грунты - переходный слой, промерзший 4-5 тыс. лет; мерзлые таберальные отложения, промерзшие около 10 тыс. лет, начиная с оптимума голоцена; ледовый комплекс – отложения различного генезиса, сингенетически промерзшие 50-60 тыс. лет назад; морские осадки, формировавшиеся непрерывно с неогенового периода и эпигенетически промерзшие около 100 тыс. лет назад. Структуру и состав микробных сообществ изучали методом метабаркодинга гипервариабельного участка V4 последовательностей генов 16S рРНК. Метагеномную ДНК выделяли с помощью набора DNeasy PowerSoil Pro Kit (QIAGEN, Германия). Амплификацию гипервариабельного участка V4 гена 16S рРНК проводили с помощью праймеров 515 и 806R с добавлением адаптеров Illumina 1 и 2. Индексацию ампликонов проводили с помощью набора Nextera XT (Illumina, США). Секвенирование библиотек ампликонов осуществляли на MiSeq (Illumina, США). Полученные данные анализировали с помощью программ qiime2, Rstudio.

Анализ генетического разнообразия прокариотических микроорганизмов показал, что наиболее значимыми и вносящими существенный вклад в структуру микробных сообществ многолетнемёрзлых отложений п-ова Быковский являются представители фил *Acidobacteriota*, *Actinobacteriota*, *Bacteroidota*, *Chloroflexi*, *Desulfobacterota, Firmicutes*, *Gemmatimonadota*, *Nitrospirota, Patescibacteria*, *Proteobacteria*, *Planctomycetota*, и *Verrucomicobacteria*. Однако их количественные характеристики и разнообразие в пределах таксона варьируют с глубиной позволяя определить границу кардинальных изменений в структуре сообществ между разными геологическими горизонтами.

Показано, что значительная доля генетического разнообразия прокариотических сообществ для всех исследуемых геологических горизонтов приходится на представителей филы *Actinobacteriota* (34-44%). Участвуя в формировании и развитии почв, они выполняют ряд важных функций, включая разложение всевозможных органических веществ, благодаря способности к синтезу внеклеточных ферментов и различных антибиотиков, зачастую определяя этим своё конкурентное преимущество. Представители этой филы, широко распространенные в морских экосистемах и относящиеся к родам *Marinsediminicola, Solirubrobacter, Microtrichales, Actinoallomurus, Actinoplanes* и *Gaiellales* обнаружены только в двух низлежащих горизонтах, что может косвенно подтверждать их морское происхождение. Второй по значимости вклад в структуру сообществ вносят представители филы *Chloroflexi* (14-18% в верхних и 26-28% в нижних геологических слоях) и представлены фотосинтезирующими факультативно анаэробными микроорганизмами с разнообразными метаболическими стратегиями, включающими и аноксигенную фототрофию. Скорее всего, именно метаболическая гибкость этих бактерий позволила им быть одной из доминирующих групп в составе исследуемых микробных

сообществ. Несмотря на то, что среди *Firmicutes* распространен межвидовой обмен различными плазмидами устойчивости, что способствует их быстрой адаптации к новым условиям и определяют устойчивость к экстремальным факторам окружающей среды, тем не менее, показано существенное снижение обилия и разнообразия с увеличением глубины залегания отложений и их возраста (с 8-13% до 4-2%). Подобное снижение также выявлено и для бактерий филы *Bacteroidota* в основном представленной аэробами и факультативными анаэробами. Однако анализ распределения микроорганизмов данной филы с увеличением глубины и возраста требует более детального изучения на уровне других таксономических рангов. Обычно самая большая по представленности в природных сообществах фила *Proteobacteria* в структуре микробных популяций многолетнемерзлых отложений п-ова Быковский выглядит более чем скромно. Среди *Proteobacteria* выявлены бактерии классов *Alfa-* и *Gammaproteobacteria* причем, если в первом случае мы наблюдаем увеличение относительного обилия с глубиной, то во втором присутствует равномерное распределение.

Таким образом, в ходе предварительного анализа данных метабаркодинга показан вклад в формирование древних микробных сообществ многолетнемерзлых отложений Быковского п-ова представителей 11 основных бактериальных фил. Полученные результаты позволяют выявить существенные различия между разновозрастными отложениями различного генезиса, определить возможные источники микроорганизмов на этапе формирования устойчивого палеосообщества и оценить, насколько активно и каким образом может происходить их вовлечение в современные биогеохимические циклы в случае деградации мерзлоты.

Работа выполнена в рамках госзаданий FFRW-2024-0004 «Сравнительно-геномный анализ регуляторных систем про- и эукариот» и 12204500038-3 «Многолетнемерзлые отложения и мерзлотные почвы: температурный режим, биота, биогеохимические процессы, и перспективы функционирования экосистем при глобальном потеплении климата».

ДЕГРАДАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВАХ ТИБЕТСКОГО ПЛАТО КАК ФАКТОР ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ ФУНКЦИЙ

Юрова А.Ю[1,2,3], Зигангирова Р.А.[3]

[1] Северо-Западный институт экологии, окружающей среды и природных ресурсов Китайской Академии Наук, Ланьчжоу, Китай

[2] ФИЦ Почвенный Институт им В.В. Докучаева, Москва

[3] НИУ Высшая Школа Экономики, факультет географии и геоинформационных технологий, Москва

Неоспоримо важную роль в функционировании высокогорных луговых почв Тибетского плато играет верхний органогенный горизонт, который в китайской почвенной классификации получил название mattic epidedon. В докладе обсуждается как именно за счет высокого содержания органического вещества (ОВ) этот горизонт определяет ряд таких важнейших функций почв, как обеспечение плодородия, накопление углерода, защита мерзлоты от негативного влияние растущих температур и даже регулирование региональных атмосферных процессов через тепло-влагообмен с атмосферой.

В течении последних 50 лет увеличение пастбищной нагрузки и смена с подвижного, на локализованный на закрепленных участок выпас привели повсеместно к деградации mattic epipedon. В докладе приводятся известные на данный момент цифры и величине потерь в единицах площади деградированных почв и массы сведенного органогенного горизонта, и делается осторожный вывод о умеренных и умерено-высоких потерях на региональном масштабе с выраженно высокими потерями локально. С помощью процессного моделирования динамики органического вещества почв (Q модель) оценивается вклад непосредственно минерализации в общие потери ОВ, которые также происходят за счет водной и ветровой эрозии. Также приводятся прогнозные сценарии дальнейшей потери ОВ для сценариев средней и высокой степени деградации пастбищных экосистем.

Модель прошла калибровку на основе данных о запасах и потоках ОВ в почвах на градиенте гидротермических условий. Поскольку наличие влаги продемонстрировало положительную роль в закреплении ОВ в этих и прочих луговых почвах, то отдельно были проведены тестовые расчеты, показывающие как уменьшение влагоудержания в почвах за счет деградации их структуры вносит свой сильный вклад в потери. В еще одном тестовом эксперименте выявлена роль дополнительного потока тепла в почву, также связанное с потерей ОВ и почвенной структуры, на темпы минерализации. Доклад завершается выводами о необходимости расширения ряда показателей, диагностирующих деградацию пастбищных экосистем, за счет набора почвенных индикаторов. Также обобщается на новом количественном уровне, потери каких важных функции удастся избежать, если установленные обоснованным образом пороги высокой степени деградации на основе индикативов растительности и почв не будут превышены на значительных по площади территориях Тибетского плато.

ИЗМЕНЕНИЯ В СВОЙСТВАХ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА КРИОГЕННОЙ ПОЧВЫ ПОСЛЕ ПОЖАРА

Юртаев А.А.[1], Бучкина Н.П.[1,2*], Шварцева О.С.[1], Балашов Е.В.[2]
[1] ТюмГУ, Тюмень
[2] ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург
[*] buchkina@agrophys.ru

Пожары существенно влияют на экосистемы лесотундровой зоны Западной Сибири. Они существенно изменяют тепловой режим почв, что может оказывать влияние на процессы трансформации и формы накапливаемого органического вещества в этих почвах.

Образцы почв для исследования отбирали через 30 лет после лесного пожара, произошедшего в 1990 году и охватившего площадь 140 км^2 на северной границе лесотундровой зоны, в междуречье рек Пур и Таз Ямало-Ненецкого автономного округа, Западная Сибирь. На территориях, пострадавших от пожара 30 лет назад, растительность претерпела значительные изменения. Кустарники, такие как *Betula nana*, стали доминирующими. Лишайниковый покров заметно уменьшился, в то время как мхи начинают занимать большую долю растительности (Heim с соавт., 2021).

В работе исследовали образцы почв из слоя 5-30 см, отобранных из 10 почвенных разрезов гари и из 10 почвенных разрезов естественного аналога.

Разделение почвенных образцов на фракции песка, пыли и глины проводили с использованием методик, предложенных в работах Кетлера с соавт. (Kettler et al., 2001) и Сайлеа с соавт. (Cylea et al., 2016). Зависимость потенциала влаги от влажности изучали с помощью психрометра WP4-T с предварительным насыщением почвенных образцов парами воды в герметично закрытом сосуде в течение суток.

Образцы исследованных почв гари содержали, в среднем, статистически достоверно ($p < 0,05$) более низкое количество общего органического вещества (0,729%) и общего азота (0,058%), чем аналогичные образцы естественной почвы (1,106% и 0,078%, соответственно) в основном за счет существенного снижения количества POM, а также органического вещества и азота, связанного с илистой фракцией почв (Рис. 1).

Ненарушенные пожаром почвы характеризовались более тесной связью между содержанием общего органического вещества и общего азота ($R^2 = 0,97$), чем почвы гари ($R^2 = 0,78$), а также более широким соотношением C/N (14,43 vs 12,52 в почве гари), что свидетельствует об изменениях, произошедших в органическом веществе почв после пожара.

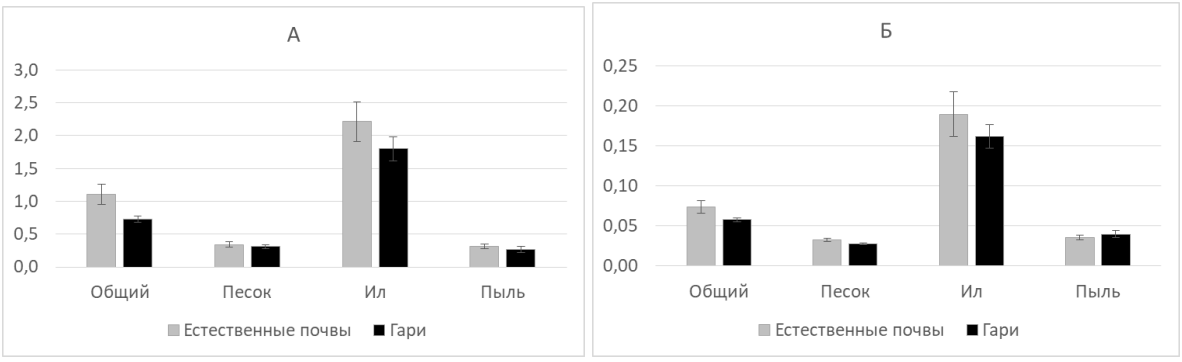


Рис. 1. Содержание общего углерода (А, %) и азота (Б, %) в слое 5-30 см (общий) и в гранулометрических фракциях (песок, пыль, ил) почвы гари и ее естественного аналога

Несмотря на существенное снижение содержания органического вещества в слое 5-30 см почвы гарей удерживают достоверно большее количество пленочной влаги (Рис. 2), что свидетельствует о более гидрофильных свойствах сформировавшегося в почвах органического вещества.

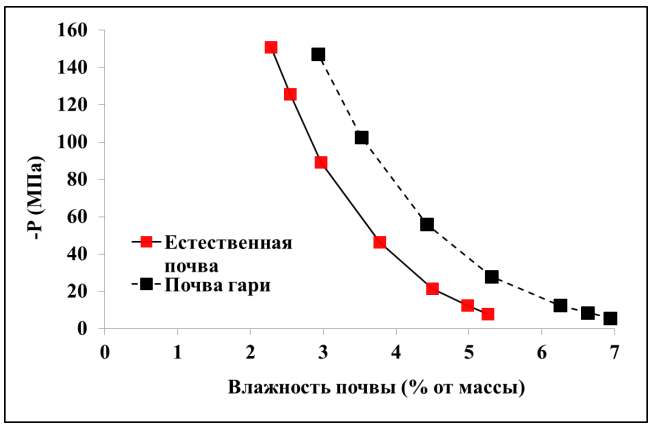


Рис. 2. Зависимость потенциала влаги от влажности в слое почвы 5-30 см в диапазоне пленочной влаги

Cylea K.T., Hill N., Young K., Jenkins T., Hancock D., Schroeder P.A., Thompson A. 2016. Substrate quality influences organic matter accumulation in the soil silt and clay fraction. Soil Biology and Biochemistry. 103:138-148.

Heim R.J., Bucharova A., Brodt L., Kamp J., Rieker D., Soromotin A.V., Yurtaev A., Hölzel N. 2021. Post-fire vegetation succession in the Siberian subarctic tundra over 45 years. Science of Total Environ. 760:143425.

Kettler T.A., Doran J.W., Gilbert T.L. 2001. Simplified method for soil particle-size determination to accompany soil-quality analyses //Soil Science Society of America Journal. 65(3):849-852.

Yurtaev A., Moskovchenko D., Sedov S., Sharapov D., Shvartseva O. 2025. The impact of fires on the fractional composition of iron and carbon dynamics in the cryogenic soils of the Forest–Tundra of Western Siberia under changing climate conditions. Soil Systems. 9(1):15.

ПРОЧЕЕ

КАФЕДРЕ КРИОЛИТОЛОГИИ И ГЛЯЦИОЛОГИИ 80 ЛЕТ

Маслаков А.А.[1], Иванов М.Н.[1], Стрелецкая И.Д.[1]
[1] МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва
alexey.maslakov@geogr.msu.ru

Осенью 2024 года исполнилось 80 лет кафедре криолитологии и гляциологии Географического факультета МГУ. Она была образована в годы Великой Отечественной Войны по инициативе Главного управления Северного морского пути. Приказом Всесоюзного комитета по делам высшей школы (ВКВШ) №531 от 27 октября 1944 г. была создана кафедра географии полярных стран. Автором концепции подготовки специалистов и первым заведующим был выдающийся отечественный океанолог и географ профессор В.Г. Богоров. Преподавание на кафедре строилось на основе страноведческого принципа. В преподавании принимали участие крупные исследователи Севера: В.П. Калынов и К.В. Зворыкин (физическая география), И.Л. Фрейдин и С.В. Славин (экономическая география), В.Г. Богоров (биогеография Севера), С.П. Качурин (мерзлотоведение), М.П. Нестерова (география и полезные ископаемые Севера).

Кафедра готовила специалистов-географов широкого профиля, хорошо знающих особенности природы Севера нашей страны. С годами круг кафедральных исследований расширился. В 1956 году декан географического факультета К.К. Марков пригласил для работы на кафедре известного в стране специалиста по мерзлотоведению доктора географических наук А.И. Попова. А.И. Попов предложил готовить на кафедре специалистов по весьма актуальному направлению – географическому мерзлотоведению и криолитологии. Это было поддержано В.Г. Богоровым и, начиная с 1956 г., учебная программа кафедры начала постепенно перестраиваться. Важным этапом развития кафедры в 60-х годах явилось организационное объединение в рамках одной кафедры мерзлотно-географического и криолитологического направления, с одной стороны, и гляциологического – с другой.

В 1967 году кафедра географии полярных стран была преобразована в кафедру криолитологии и гляциологии, руководителем которой до 1993 года был профессор А.И. Попов. С 1993 по 2018 гг. кафедрой руководил доктор географических наук, профессор В.Н. Конищев. В настоящий момент кафедру возглавляет доцент И.Д. Стрелецкая.

На сегодняшний день коллектив кафедры составляют 21 человек, из них 17 кандидатов и 1 доктор наук. При финансовой поддержке различных организаций (РФФИ, РНФ, РГО, Правительство РФ, Правительство ЯНАО) сотрудниками кафедры ведётся активная научно-образовательная деятельность, результаты которой регулярно публикуются в ведущих международных журналах. Ежегодно в свет выходят научные статьи по основным научным направлениям кафедры: криогенез как фактор формирования состава и строения пород, эволюция криосферы, палеогляциология и палеокриолитология, мерзлые толщи и подземные льды Арктики, мерзлотные процессы и явления, опасные нивально-гляциальные процессы в горах, современное состояние и эволюция горных ледников, мониторинг баланса массы ледников, снежный покров и снежность равнин и гор, инженерная гляциология и мерзлотоведение, геоэкологические проблемы в равнинной и горной криолитозоне.

Кафедра криолитологии и гляциологии – сплоченный коллектив ученых, преподавателей и студентов, известный во всем мире своими научными достижениями и ежегодной подготовкой 10–15 высококлассных специалистов в области изучения криосферы нашей планеты. За 80 лет кафедра подготовила свыше семисот специалистов, несколько десятков кандидатов и десять докторов наук. Ряд выпускников кафедры работают за рубежом: в Европе, США, Канаде, Японии, Аргентине. Выпускники кафедры – географы-криолитологи и гляциологи, геоэкологи криосферы – работают в научных, производственных и проектных организациях, занимающихся фундаментальными исследованиями криолитозоны и гляциосферы Земли, изысканиями при освоении Севера и горных территорий, мерзлотно-гляциальным мониторингом, охраной природы и рациональным природопользованием на Севере и высокогорьях.

ЖУРНАЛ «КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ» – ВЕДУЩИЙ РОССИЙСКИЙ ЖУРНАЛ В ОБЛАСТИ МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЯ

Облогов Г.Е.[1], Тумской В.Е.[2], Арутюнян Н.В.[1], Белова Н.Г.[1]
Лисицына О.М.[2,3], Железняк М.Н.[2]
[1]*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень;*
[2]*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск;*
[3]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*
kriozem@gmail.com

С момента основания в 1997 году журнал Криосфера Земли публиковал результаты географических, геологических, биологических и прикладных направлений исследований о мире холода. В перечень научных направлений журнала входят фундаментальные и актуальные прикладные аспекты строительства и эксплуатации зданий, сооружений, производственных и линейных объектов на мерзлых грунтах, обеспечения устойчивости инженерных сооружений, современные методы исследования мерзлых пород, последние данные мониторинга состояния мерзлых толщ в различных регионах, последствия климатических изменений, кризисные и чрезвычайные ситуации в холодных регионах.

Редколлегия и редакционная группа журнала состоят из общепризнанных специалистов в области криологии, геокриологии и инженерного мерзлотоведения, гляциологии, активно работающих в различных научных организациях. Зачинателем и главным редактором журнала более четверти века был академик В.П. Мельников, а редакционная группа журнала долгое время возглавлялась д.г.-м.н. С.М. Фотиевым. В 2023 г. главным редактором журнала стал чл.-корр. РАН, д.г.-м.н. М.Н. Железняк, директор Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова.

В качестве научных рецензентов привлекаются ведущие специалисты из различных областей знаний. Среди читателей и авторов журнала присутствуют представители десятков научных и проектных организаций по всей стране и за рубежом.

В настоящее время журнал индексируется в SCOPUS (относится к журналам второго квартиля Q2) и РИНЦ, входит в ядро основных российских журналов Web of Science, список журналов ВАК. Статьи публикуются на русском языке, а с 2014 г. они полностью переводятся на английский язык и издаются как английская версия журнала в электронном виде под названием “Earth`s Cryosphere”. Переводом статей журнала на английский язык занимаются как профессиональные переводчики, долгие годы работавшие в разных научных издательствах, так и специалисты в области криологии Земли, свободно владеющие английским языком. В 2022 г. в редакционной группе появился главный редактор английского перевода, которым стал хорошо известный всем участникам пущинских конференций Д.Е. Конюшков.

Как и многие отечественные журналы, «Криосфера Земли» испытывает в последние годы трудности с финансированием. Поэтому частью редакционной деятельности стал поиск спонсоров, которых не так просто найти в наше время. Пользуясь возможностью, вся редакторская команда журнала выражает искреннюю благодарность руководству ООО «НПО «Север»», ООО «Северные изыскания» и компании Норникель за помощь в издании журнала.

Архив выпусков журнала и правила подачи статей доступны на сайте редакционной группы http://earthcryosphere.ru/. Архив также размещен на платформе Научной электронной библиотеки https://elibrary.ru/, где постепенно пополняется, а также на сайте издательства СО РАН, где размещены последние выпуски журнала и правила подачи статей.

В настоящее время одним из приоритетов работы редакционной группы остается сохранение высокого научного уровня публикаций. Это подразумевает подготовку статей, посвященных интересным и актуальным современным исследованиям, логически структурированных, написанных грамотным русским языком с корректным использованием научных терминов. Поэтому обращаем внимание авторов – соблюдение этих требований при подготовке Ваших статей сильно ускоряет процесс публикации результатов исследований!

ATTENDEES AND MEMORIAL FOR PARTICIPANTS IN INTERNATIONAL CONFERENCES ON PERMAFROST (1963-2024)

Julia Stanilovskaya[1], Jerry Brown[2], Irina Streletskaya[3]
[1]Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Moscow, Russia;
[2] Ithaca, NY, USA;
[3]Lomonosov Moscow State University
stanik85@mail.ru, jerrybrown@igc.org, irinastrelets@gmail.com

This poster presents an update of the DVD database presented at the 2016 11th Conference the 50th anniversary conference report (Brown and Stanilovskaya, 2014, Brown et al. 2016) and an informal poster presented at the 12th ICOP. In addition to adding to the Potsdam and Whitehorse attendees to the database, a concerted effort has been made to identify those participants in the past eleven conferences who are known to be deceased. Of the total 4152 participants who have attended one or more of the twelve conferences, 284 are identified as deceased. This poster provides a memorial to those deceased participants and to those who are yet to be identified. Their names are presented by the number of conferences attended. Those deceased since the 2016 conference are presented in a special panel as a tribute. Although Stanislav V. Gubin did not attend ICOPs, we pay tribute to him in this presentation. We thank representatives of the members countries of the International Permafrost Association and many individuals who assisted in identifying the deceased participants. We acknowledge that the list is incomplete and therefore, please send additions to: jerrybrown@igc.org.

Table 1. Participants in ICOPs from 45 Countries and known deceased

Country		Country		Country	
USA	1294[95]	Netherlands	25[2]	India	3
Canada	902[39]	Spain	15	Nepal	3
Russia	680[83]	Portugal	10	Hong Kong	3
China	259[12]	Belgium	10[1]	Estonia	2
Germany	256[4]	Argentina	9[1]	Iceland	2
Switzerland	99	Mongolia	9	Belarus	2
Norway	87[8]	Greenland	7	Australia	1
UK	78[3]	South Korea	7	Gambia	1
Japan	63[9]	Czechia	7[1]	Georgia	1
Sweden	58[8]	New Zealand	6	Ghana	1
France	46[4]	South Africa	6	Kazakhstan	1[1]
Poland	41[8]	Romania	6	Malaysia	1
Finland	38[1]	Slovenia	4[1]	Turkey	1
Denmark	36	Israel	4		
Italy	34	Chile	4	**Individuals**	**4152[284]**
Austria	27	Hungary	3[2]		

Note: Number of participants. Known number of deceased is above the line text

Table 2. Honor Roll of Recently Deceased Participants (2016-2024)

Canada

Blake, Eston (2021)[1]

Bliss, Larry (2019)[1]

Carlson, Lorne (2024)[2]

French, Hugh (2019)[9]

Gold, Lorne (2018)[2]

Hamelin, Louis-Edmond (2020)[1]

Harry, David (2024)[2]

Heginbottom, Alan (2022)[5]

Hobson, Arlie (2019)[1]

Jakob, Matthias (2022)[1]

Janowicz, Richard (2018)[1]

Kerfoot, Dennis (2023)[2]

King, Roger (2018)[1]

Ladanyi, Branko (2022)[6]

Mollard, John (Jack) (2017)[2]

Smith, Michael (2022)[4]

Strangway, David (2016)[1]

Svoboda, Josef (2022)[1]

Taylor, Alan (2020)[3]

Torrance, J. Kenneth (2021)[1]

Van Everdingen, Robert (2024)[6]

Williams, Peter (2019)[5]

Woo, Caroline (2016)[1]

China

Guo, Dongxin (2022)[1]

Tong, Boliang (2023)[1]

Tong, Changjiang (2023)[1]

Zhang, Changqing (2022)[1]

Czechia

Demek, Jaromir (2017)[1]

Finland

Seppälä, Matti (2020)[3]

France

Aguirre-Puente, Jamie (2017)[5]

Grenier, Christophe (2022)[3]

Malaurie, Jean (2024)[1]

Germany

Hagedorn, Horst (2018)[2]

Japan

Higuchi, Keiji (2018)[1]

Iguro, Mizuhito (2022)[1]

Tanaka, Masuhiro (2023)[1]

Kazakhstan

Gorbunov, Aldar (2018)[3]

Netherlands

Vandenberghe, Els (2022)[1]

Norway

Flaate, Kaare (2018)[6]

Haaland, Gisle (2019)[2]

Salvigsen, Otto (2018)[1]

Sollid, Johan Ludvig (2019)[2]

Poland

Pekala, Kazimierz (2018)[1]

Starkel, Leszak (2021)[1]

Russia

Baulin, Vladimir (2020)[3]

Chizhov, Aleksandr (2023)[1]

Fotiev, Sergey (2017)[2]

Galanin, Alexey (2022)[1]

Garagulya, Ludmila (2019)[1]

Golubev, Vladimir (2020)[1]

Gorshkov, Sergei (2018)[1]

Kondratiev, Valentin (2016)[2]

Konishchev, Vacheslav (2020)[2]

Kritsuk, Larisa (2021)[1]

Laukhin, Stanislav (2021)[1]

Moskalenko, Natalia (2019)[3]

Mudrov, Yury (2017)[1]

Oberman, Naum (2021)[3]

Panchenko, Evgeny (2022)[1]

Perlshteyn, Georgiy (2020)[6]

Roman, Lydia (2017)[1]

Romanovskii, Nikolai (2016)[4]

Shesternev, Dmitry (2019)[1]

Solomatin, Vladimir (2019)[2]

Sukhodolskiy, Sergey (2020)[1]

Ter-Martirosyan, Zaven (2023)[1]

Tolstikhin, Nestor (2019)[1]

Tumel, Nelli (2019)[1]

Vtyurina, Ekaterina (2017)[1]

Zabolotnik, Stanislav (2023)[5]

Sweden

Svensson, Harald (2022)[3]

UK

Rendel, Williams (2021)[1]

United States

Barry, Roger (2018)[5]

Beistline, Earl (2021)[2]

Brown, Celia (2024)[6]

Cameron, Richard (2019)[1]

Chamberlain, Edwin (2017)[4]

Daanen, Ronald (2023)[2]

Ferrians, Jr, Oscar (2019)[9]

Iskandar, Alex (2023)[1]

Krzewinski, Thomas (2023)[5]

Lachenbruch, Arthur (2021)[3]

Lachenbruch, Edith (2016)[1]

Lewellen, Robert (2024)[4]

Metz, Michael (2017)[2]

Nakano, Yoshisuke (2016)[2]

Outcalt, Samuel (2023)[5]

Quinn, William (2023)[1]

Rooney, Florence (2018)[4]

Slater, Andrew (2016)

Tobiasson, Wayne (2020)[2]

Ugolini, Fiorenzo (2023)[3]

Walegur, Michael (2018)[1]

Wayne, William (2019)[6]

Zhang, Tingjun (2022)[4]

Note*: Former IPA officers*

Note: Number of ICOPs participated in is above the line text

Brown, J. and J. Stanilovskaya, 2014. The 50th Anniversary of the First International Conference on Permafrost. Engineering Geology for Society and Territory-Volume 7, Giorgio Lollono et al. (eds), Springer International Publishing Switzerland, pp. 247-250. DOI: 10.1007/978-3-319-09303-1-49.

Brown, J., M. McGraw, J. Stanilovskaya, 2016. A database of participants attending the International Conferences on Permafrost (1963-2012). In: Günther, F. and Morgenstern, A. (Eds.) X International Conference on Permafrost – Book of Abstracts, 20 – 24 June 2016, Potsdam, Germany. Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, DOI: 10.2312/GFZ.LIS.2016.001, pp. 1200-1202.

Brown, J., Stanilovskaya, J., McGraw, M., and Lewkowicz, A., 2024. Attendees and Memorial for Participants in International Conferences on Permafrost (1963-2016), poster presented at the International Conference on Permafrost, Whitehorse, Canada (June 2024).

КРУГЛЫЙ СТОЛ:
"Криогенные структуры почвенного покрова: генезис, география, картография, экологические функции"

ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ВЫЗОВЫ

Горячкин С.В.
Институт географии РАН, Москва
goryachkin@igras.ru

Учение о структуре почвенного покрова (СПП) в наши дни находится в принципиально иной научно-технологической среде по сравнению со временем своего основания в 1965 году. По-видимому, та часть учения о СПП, которая выполняла служебные функции, во многом утрачивает свое значение, так как ГИС-технологии и парциальный (по отдельным свойствам) анализ позволяют решать эти задачи проще для конечного пользователя. Вероятно, один из возможных путей трехмерного подхода в почвоведении – это широкое развитие ГИС по многим физическим, химическим, минералогическим и биологическим параметрам почв, связанных с рельефом и другими местными факторами почвообразования. Однако не следует забывать, что при переходе от локального к крупному, а от крупного к среднему масштабу исследования и так далее остро встает вопрос об экстраполяции данных. И хотя по этой проблеме также развиваются формализованные подходы, основанные на использовании цифровых моделей рельефа и дистанционных методов, без морфогенетического анализа почв и почвенного покрова грамотная экстраполяция точечных почвенных данных на пространство невозможна. В связи с этим можно сделать благоприятный прогноз для развития докучаевского почвоведения и базового, теоретического «крыла» концепции СПП. Представляется, что концепция СПП в ее стержневой составляющей будет развиваться в тех основных направлениях, на которые указывал Ф.И.Козловский, – морфоструктурном (изучаемым морфостатикой и морфодинамикой), функциональном и информационном. Кроме того, должен быть обязательно сохранен и развит генетико-эволюционный анализ почвенного покрова, позволяющий давать смысловую составляющую современным количественным подходам к его изучению.

Это все касается и криогенных структур почвенного покрова. Однако количественные подходы требует внесения дополнений в аппарат и тезаурус теории СПП. Предлагается уточнить размеры микроструктур, введя понятие «паттерн» и использовать систему СИ. Таким образом, целесообразно микроструктуры с размером элементарных ареалов n*1м обозначать как «метропаттерны», а с ареалами $n*10^{-1}$м «дециппаттерны», $n*10^{1}$м – «декапаттерны», $n*10^{2}$м – «гектапаттерны». Это позволит избежать путаницы с терминами «микро-» и «наноструктуры», которые употребляются широко, но без четких количественных привязок. Кроме того, необходимо уточнить криогенные процессы, благодаря которым формируются криогенные микроструктуры, например, «пучинные», «морозно-сортированные», «термокарстовые» и т.д. Это связано с тем, что одной формы (бугорковатые, полигонально-трещинные) для обозначения криогенных структур недостаточно, поскольку одинаковую форму могут иметь паттерны разного генезиса.

Дальнейшее изучение криогенных СПП видится в применении высокотехнологической аппаратуры на БПЛА. Повышение доступности использования данных лазерного сканирования дают новые возможности для исследования геоморфологических особенностей поверхности в условиях ярусности ландшафта. Способность лазерного сканирования проникать до поверхности под древесным покровом дает возможность получить информацию о таежных криогенных СПП.

КРИОГЕННЫЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПОДЗОНЫ ТИПИЧНЫХ ТУНДР ЕТР

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

Криогенные микроструктуры почвенного покрова (КМС) – широко распространенное в арктической зоне явление почвенной неоднородности, известное также как «криогенные почвенные комплексы», а в мерзлотоведении как «структурные грунты». Поскольку КМС весьма разнообразны, то для их характеристики и типизации недостаточно принципов, предложенных в теории структур почвенного покрова. Поэтому список параметров, описывающих КМС, был уточнен и дополнен: геометрическое строение поверхности рассматривалось отдельно от генезиса и отдельно от них – морфонное строение почвенных тел (закономерное взаиморасположение морфонов в профиле почвы), ставшее основой для дальнейшей типизации.

Полевые исследования проводились в летний период (июнь-август) на Болванском полуострове, островах Печорской губы и в разных районах о. Колгуев с 2018 по 2023 год. Всего на исследованных территориях было описано пять ранее известных типов КМС, а также ряд заметно отличающихся типов (рис. 1).

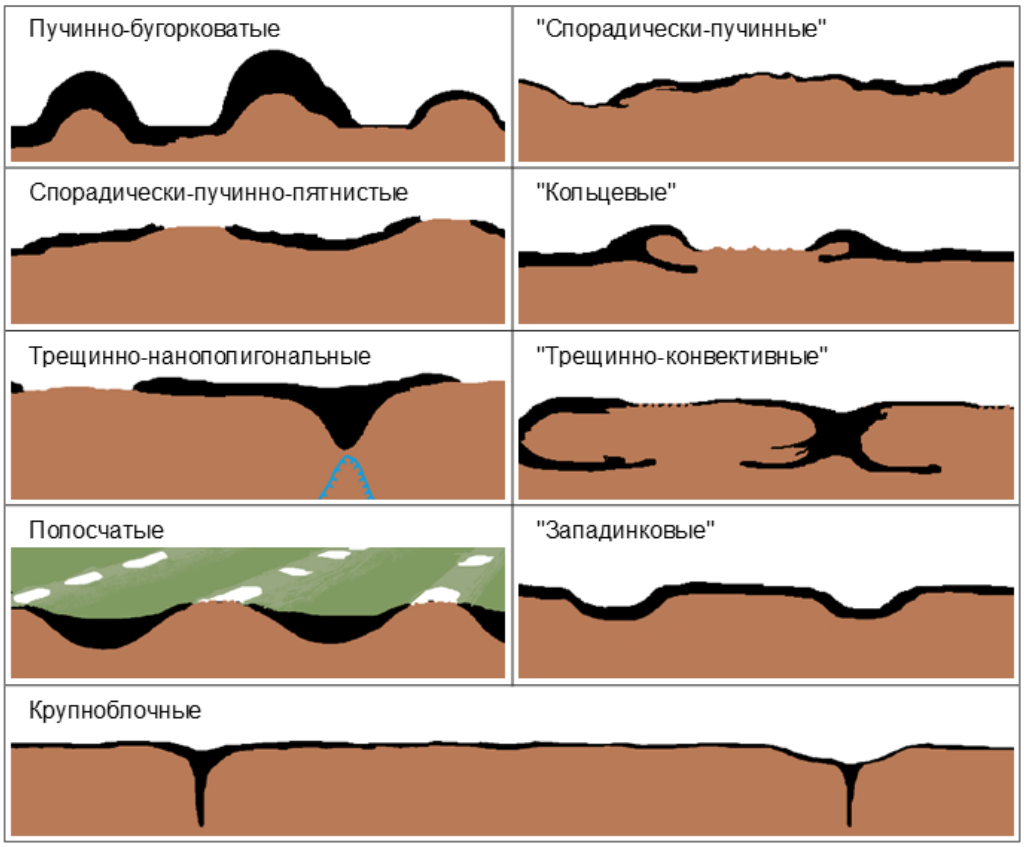


Рисунок 1. Типы криогенных микроструктур почвенного покрова, описанные автором в подзоне типичных тундр ЕТР. Черным цветом показаны органические горизонты почв, коричневым – минеральные. Названия даны в соответствии с Атласом Арктики (1985).

Анализ полученных материалов показал, что КМС могут занимать различные положения в ландшафте (табл. 1). При этом, одни типы КМС проявляют узкую ландшафтную приуроченность (например, трещинно-нанополигональные), другие имеют широкий диапазон экологических условий (например, пучинно-бугорковатые).

Состав типов КМС каждого из изученных районов отличается, что в первую очередь связано с различным геолого-геоморфологическим строением. Среди исследованных территорий остров Колгуев отличается наиболее высоким разнообразием КМС: от 4 до 6 типов для каждого

ландшафтного района, а плоские и песчаные острова Печорской губы наиболее бедны разнообразием КМС.

Таблица 1. Положение различных типов криогенных микроструктур почвенного покрова в матрице факторов

Рельеф		Бровки долин	Вершины холмов; выпуклые склоны		Плоские водораздельные поверхности	Ровные склоны	Нижние части склонов; ложбины
Уклон		0-5°		0-2°			
Дренированность		Дренированные позиции			Умеренно-дренированные позиции		С избыточным увлажнением
Почвообразующие породы	Суглинки средние и тяжелые	СПП, ТК, З	$К^1$, З	ТН, ТК, $К^2$, П	СП, $К^3$	Б, П	Б
	Опесчаненные суглинки	СПП(?)		Б	Б(?)	Б	Б
	Пески	СПП	КБ		КБ		Б
	Двучленные отложения					СП	

Примечание: Типы КМС: Б – пучинно-бугорковатые; СПП – спорадически-пучинно-пятнистые; СП – спорадически-пучинные; КБ – крупноблочные; ТН – трещинно-нанополигональные; ТК – трещинно-конвективные; $К^1$ – кольцевые – группы отдельно расположенных 2-4 колец; $К^2$ – кольцевые – кольца образуют сплошные скопления; $К^3$ – кольцевые – разреженные скопления колец без пятен в центре; З – западинковые; П – полосчатые

На исследованных территориях были выявлены участки почвенного покрова с выраженным микрорельефом, но представленные одним ЭПА почв (некоторые спорадически-пучинные и пучинно-бугорковатые КМС); и наоборот – описаны контрастные почвенные комплексы без выраженного микрорельефа поверхности (трещинно-нанополигональные, трещинно-конвективные). Помимо этого, было показано, что разные типы КМС могут принадлежать одному типу структурных грунтов (иметь один узор поверхности), и наоборот: один тип КМС может иметь разные формы, например, бугорки могут быть как округлыми, так и вытянутыми, наподобие полос.

Было установлено: 1) что некоторые типы почв встречаются только в составе КМС; 2) что один и тот же тип почв может занимать разные позиции в микрорельефе; 3) что для одних КМС характерно несколько вариантов состава (например, спорадически-пучинно-пятнистые), а для других – только один (например, полосчатые); 4) что почвы, входящие в состав некоторых КМС, формируются независимо друг от друга: наличие западинок, корразионных пятен и некоторых

бугорков слабо влияет на свойства фоновой почвы. Такие микроструктуры нельзя отнести к комплексам или пятнистостям, а, видимо, следует считать микро-мозаиками или микро-ташетами.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0010