

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова
Сибирского отделения РАН

**УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ КРИОЛИТОЗОНЫ В УСЛОВИЯХ
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

**МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННОЙ 150-ЛЕТИЮ М. И. СУМГИНА**

г. Якутск, Россия, 22–24 марта 2023 г.

Ответственные редакторы:
доктор технических наук Р. В. Чжан;
доктор географических наук А. Н. Фёдоров;
доктор географических наук М. Н. Григорьев

Якутск
Издательство ФГБУН Институт мерзлотоведения
им. П. И. Мельникова СО РАН

УДК 551.34+624.139(063)

ББК26.36(Я431)

У79

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, 22–24 марта 2023 г. / ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения РАН; отв. ред.-ры: д.т.н. Р. В. Чжан; д.г.н. А. Н. Фёдоров; д.г.н. М. Н. Григорьев. – Якутск : Издательство ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2023. – 243 с.

ISBN 978-5-93254-208-8

Сборник включает материалы докладов, представленных на Всероссийской конференции с международным участием «Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата», посвященной 150-летию основоположника мерзлотоведения, выдающегося ученого и организатора науки Михаила Ивановича Сумгина. В сборнике опубликованы 80 докладов, рассматривающих фундаментальные научные проблемы, связанные с состоянием криолитозоны, динамикой ее изменения, освоением территорий криолитозоны, в том числе – строительством инженерных сооружений в условиях меняющегося климата. Важное место отведено обсуждению современных методик изучения теплового состояния криолитозоны, реконструкции истории ее формирования и развития, эволюции мерзлых толщ, инженерно-геологических и гидрогеологических исследований, а также методов и технологий сохранения и возведения фундаментов инженерных сооружений при изменении климата.

УДК 551.34+624.139(063)

ББК 26.36 (Я431)

ISBN 978-5-93254-208-8

© Институт мерзлотоведения
им. П. И. Мельникова СО РАН

ПРЕДИСЛОВИЕ

22–24 марта 2023 г. в рамках плана мероприятий председательства Российской Федерации в Арктическом совете в 2021–2023 годах, на площадках Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова и Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН состоялась международная конференция по вопросам изменения климата и таяния вечной мерзлоты. Научное событие стало завершающим по данной проблематике. В работе конференции приняли участие 493 делегата, в том числе 347 – в очном формате и 146 – дистанционно. Среди участников были отмечены видные государственные и научные деятели России, Казахстана, Китая, Монголии, Китая, Японии и США, руководители международных организаций, ведущие ученые и практики в области исследований климата и вечной мерзлоты, представители общественности, бизнеса и средств массовой информации. Мероприятия прошли в очном и дистанционном форматах. Площадки для участников были организованы в Москве, Пекине и Астане.

Основной целью международной конференции являлся поиск практических и научно-обоснованных решений, направленных на адаптацию глобальной экономики к изменениям климата и проблемам криосферы. В рамках конференции прошли круглые столы, дискуссионные площадки, пленарные заседания, выставка инновационных проектов научно-образовательных центров мирового уровня и конкурс молодежных научных «зеленых проектов».

Одним из важных мероприятий в рамках данного события стала Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата», посвященная 150-летию М. И. Сумгина. В течение трех дней ее работа была направлена на обсуждение проблем мерзлотоведения (геокриологии) в условиях изменения климата и интенсивных темпов промышленного освоения криолитозоны по трем основным направлениям: 1) современное состояние и динамика континентальной и субарктической криолитозоны; 2) тепловое и механическое взаимодействия природно-технических систем в криолитозоне. Технологии строительства и изысканий на Севере; 3) устойчивость мерзлотных экосистем. Криогенные процессы и явления. Криолитозона урбанизированных территорий.

Важное место было отведено рассмотрению современных методик изучения теплового состояния криолитозоны, эволюции мерзлых толщ, реконструкции истории ее формирования и развития, инженерно-геологических и гидрогеологических исследований, а

также методов и технологий сохранения и возведения фундаментов инженерных сооружений при изменении климата.

В числе участников были такие видные ученые, как к.г.-м.н. В. Е. Романовский (Университет штата Аляска, США), акад. РАН В.А. Семёнов (Институт физики и атмосферы РАН), чл.-корр. РАН Е. Ж. Гармаев (Байкальский институт природопользования СО РАН), д.г.-м.н. А. В. Брушков (Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова).

Оргкомитет конференции выражает глубокую признательность всем коллегам, принявшим участие в ее работе в очном формате и онлайн.

Тексты докладов публикуются в авторской редакции с некоторыми коррективами ответственных редакторов.

СЕКЦИЯ 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ДИНАМИКА КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ И СУБАКВАЛЬНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ТЕМПЕРАТУРЕ ГРУНТОВ БАССЕЙНА ВЕРХНЕЙ КОЛЫМЫ Д.А. Абрамов^{1*}, О.М. Макарьева², А.А. Землянскова², Н.В. Нестерова³, А.А. Остахов², Е.Г. Егоров¹

1 – Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

2 – Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

3 – Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

* dmitrii.abramov@student.msu.ru

Аннотация. С целью развития региональной сети геокриологического мониторинга Магаданской области в 2021-2022 гг. на территории Верхнеколымского нагорья было оборудовано 9 термометрических скважин глубиной до 15 м. Получены первые данные о распределении температуры грунта в различных ландшафтных условиях. Получены такие характеристики криолитозоны территории, как среднегодовая температура пород, глубина сезонного оттаивания/промерзания, глубина нулевых годовых амплитуд. На основании полученных данных и опыта проведения работ планируется дальнейшее развитие сети регионального мониторинга.

Ключевые слова: геокриологический мониторинг, многолетнемерзлые грунты, сезонно-талый слой, Магаданская область, бассейн Колымы.

NEW DATA ON GROUND TEMPERATURE IN THE UPPER KOLYMA BASIN D.A. Abramov^{1*}, O.M. Makarieva², A.A. Zemlianskova², N.V. Nesterova³, A.A. Ostashov², E.G. Egorov¹

1 – Lomonosov Moscow state university, Moscow, Russia

2 – St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

3 – State hydrological institute, St. Petersburg, Russia

* dmitrii.abramov@student.msu.ru

Abstract. To develop the regional network of geocryological monitoring of the Magadan region in 2021-2022 9 thermometric wells up to 15 m depth were installed in the Upper Kolyma Basin. The first data on ground temperature distribution were obtained. The characteristics of permafrost of the territory, such as mean annual ground temperature, depth of seasonal thawing/freezing, depth of zero annual amplitude were obtained. Further development of the regional monitoring network is planned on the basis of the data and experience gained.

Keywords: geocryological monitoring, permafrost, seasonal thaw layer, Magadan district, the Kolyma River basin.

Для обеспечения инженерно-хозяйственной деятельности в Магаданской области (МО) необходимо изучение криолитозоны, так как с ее трансформацией может быть связан значительный ущерб для инфраструктуры региона (*Streletskiy et al., 2019; Melnikov. et al., 2022*). Наиболее востребованным методом оценки состояния и динамики многолетнемерзлых грунтов является температурный мониторинг. На данный момент сеть существующих термометрических скважин в МО не отвечает требованиям, заявленным в государственной программе развития сети геокриологического мониторинга (*Мельников и др., 2022*) Росгидромет планирует оборудовать в МО до трех скважин глубиной 30 м в городах Сусуман, Усть-Омчуг и Омсукчан. Первые данные будут получены не ранее 2026 г., помимо этого существующая наблюдательная сеть Росгидромета не соответствует современным

требованиям (Веркулич и др., 2021). Из 8 скважин, состоящих в сети глобального геокриологического мониторинга GTN-P, данные опубликованы лишь по двум из них, установленным на незначительном расстоянии от побережья Охотского моря, что крайне непредставительно для региона. Многие когда-то действующие скважины закрыты и новой информации о температуре грунтов региона практически нет (рис. 1).



Рисунок 1. Схема наблюдательных пунктов Магаданской области за всю историю изучения.

В целях организации сети геокриологического мониторинга в МО группой авторов было пробурено и оборудовано 9 термометрических скважин. Скважины расположены в пределах Тенькинского городского округа и в орографическом отношении относятся к территории Верхнеколымского нагорья. Абсолютные отметки скважин – 600–1200 м. Климат района – континентальный. Средняя годовая температура воздуха по данным метеостанций Усть-Омчуг (1946–2020 гг.) и Колымская (1949–2014 гг.) составляет $-9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя температура наиболее холодного месяца (январь) $-33.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-34.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя температура воздуха наиболее теплого месяца (июль) $+14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+13.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Средние месячные значения температуры воздуха отрицательны в течение семи месяцев с октября по апрель включительно. Количество осадков в пос. Усть-Омчуг и на м/с Колымская составляют 341 и 354 мм в год соответственно. В холодный период года выпадает около 30–40 % осадков. Снежный покров формируется к середине октября и разрушается в конце мая.

Основными природно-территориальными комплексами (Мельников и др., 2022), в области которых пробурены скважины, являются лиственничные редколесья, каменные осыпи, горная тундра, долины рек и наледная поляна.

Бурение проводилось в два этапа: первые 4 скважины были пробурены в 2021 году без отбора керна, последующие 5 – в 2022 г. с отбором керна. К настоящему моменту получены первые ряды данных о температуре грунтов за круглый год по 4 из 9 скважин, а также распределение температуры грунта по глубине к окончанию летнего сезона 2022 г. на трех новых скважинах. Полученные данные позволяют оценить такие характеристики ММП данной области, как среднегодовая температура пород T_{cp} , глубина ξ и скорость сезонного оттаивания/промерзания, глубина нулевых годовых амплитуд H_0 .

Таким образом, на территории Верхнеколымского нагорья геофизиологические характеристики грунтов существенно разнятся при переходе от одного природно-территориального комплекса к другому. По полученным данным среднегодовая температура мерзлых грунтов составляет от -0.1 °C до -3.8 °C. Глубина сезонного оттаивания колеблется в пределах 0.9 – 2.6 м. А глубина сезонного промерзания в обнаруженных таликовых зонах составляет 2.6 м.

В 2023 году планируется дальнейшее обустройство мониторинговой сети в МО на основе полученного опыта. Полученные данные будут использоваться в оценке динамики и состояния криолитозоны региона в рамках глобального изменения климата.

Исследования проводятся при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект 75295776).

Литература

Веркулич С. Р., Демидов Н. Э., Анисимов М. А. Разработка проекта организации мониторинга многолетнемерзлых грунтов высокоширотной Арктики на базе наблюдательной сети Росгидромета // Российские полярные исследования. – 2021. – Т. 43, № 1. – С. 23–27.

Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др. Развитие геофизиологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне российской федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса // Криосфера Земли. – 2022. – Т. XXVI, № 4. – С. 3–18.

Melnikov V. P. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: Potential economic impacts on public infrastructure by 2050 // Natural Hazards. – 2022. – Т. 112, № 1. – С. 231–251.

Dmitry A Streletskiy et al Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost / Environ. Res. Lett. – 2019. – 14 (2019) 025003.

ГОРНАЯ КРИОЛИТОЗОНА ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

С.В. Алексеев*, Л.П. Алексеева, А.А. Светлаков, В.А. Пеллинен

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

* salex@crust.irk.ru

Аннотация. Тезисно представлены результаты комплексных исследований криолитозоны Окинского плоскогорья (Восточный Саян). Приведены новые данные о литологическом и криогенном строении, мощности многолетнемерзлых пород, их температурном режиме. Установлено, что до глубины 45 м разрез представлен рыхлыми отложениями озерно-аллювиального и гляциального генезиса с прослоями и линзами льда. Многолетнемерзлые породы имеют мощность 43–56 м и среднегодовую температуру –1 °С. Обширные площади занимают минеральные бугры пучения сегрегационно-инъекционного генезиса. Устойчивый многолетний положительный тренд среднегодовой температуры воздуха в долине р. Сенца способствует постепенному повышению температуры мерзлых рыхлых отложений в слое годовых теплооборотов, разрушению бугров пучения и опусканию их кровли, изменению морфологии поверхности речной террасы, интенсивному отступанию ее бровки.

Ключевые слова: горная криолитозона, рыхлые отложения, температурный режим, бугры пучения, подземные льды, Окинское плоскогорье.

MOUNTAIN PERMAFROST OF THE SOUTH OF EASTERN SIBERIA. CURRENT STATE IN THE CONDITIONS OF CHANGING CLIMATE

S.V. Alexeev*, L.P. Alexeeva, A.A. Svetlakov, V.A. Pellinen

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

* salex@crust.irk.ru

Abstract. This article abstractly presents the results of comprehensive research of Oka Plateau permafrost in the Eastern Sayan. New data is proposed about the lithological and cryogenic structure, permafrost thickness, thermal regime. It has been established that down to a depth of 45 m the geological section is composed of unconsolidated lacustrine-alluvial and glacial sediments with ice interlayers and lenses. The permafrost is 43-56-m thick. Mean annual ground temperature is -1 °C. Ice-mineral frost mounds of segregation-injection genesis are widespread. A stable long-lasting positive trend of mean annual air temperature in the Sentsa valley contributes to a gradual increase of the frozen sediment temperature in the layer of annual temperature fluctuation. It is also responsible for the destruction of frost mounds and their table lowering, causing a change in the morphology of the river terrace and an intensive retreat of its edge.

Keywords: mountain permafrost, unconsolidated sediments, thermal regime, frost mounds, ground ice, Oka Plateau.

В настоящее время не решены еще многие спорные вопросы, касающиеся эволюции мерзлых толщ и криогенных образований в пределах крупных геоструктур Восточной Сибири. Одной из них является Алтае-Саянская горно-складчатая область. Темпы освоения высокогорных районов требуют решения сложнейших научных и связанных с ними технических задач при прокладке крупных транспортных магистралей, возведении различных инженерных сооружений, добыче полезных ископаемых и т.д. До последнего времени Окинское плоскогорье в Восточных Саянах являлось «белым пятном» для специалистов-геокриологов вследствие удаленности этого природного объекта, а также отсутствия глубокого опорного бурения в долинах рек и на водоразделах, данных съемок целевого назначения.

В этой связи усилия авторов были направлены на установление основных параметров криолитозоны Окинского плоскогорья, а также выявление их современной динамики.

Комплексные исследования в течение нескольких лет были сосредоточены в долине р. Сенца – притока р. Ока, которая прорезает Окинское плоскогорье на глубину 800 м. Долина представляет собой классический трог с элементами ледникового рельефа в виде боковых и конечных морен позднеплейстоценового возраста и интенсивно меандрирующим руслом реки. Отложения озерно-аллювиального, гляциального, делювиального и пролювиального генезиса, выполняющие долину реки, представлены глинами, суглинками, супесями, песками, галечниками, валунами.

Результаты бурения и вертикального электрического зондирования в долине р. Сенца показали, что мощность рыхлых пород изменяется от 70 до 105 м. До глубины 43 м озерно-аллювиальные и флювио-гляциальные отложения представлены переслаивающимися льдистыми суглинками, глинами, песками и супесями. На глубине 44 м вскрыт напорный водоносный горизонт. Напор над его кровлей составил 16.7 м, а уровень подземных вод установился на глубине 27.3 м.

Позднеплейстоценовое оледенение Восточного Саяна и голоценовая дегляциация обусловили формирование подпрудного озера в долине р. Сенца (Олюнин, 1965; Гросвальд, 1987; Аржанников и др., 2015). Режим седиментации в озере многократно изменялся, обеспечивая чередуемое накопление осадков различного гранулометрического состава и степени сортировки. Расчетная позднеголоценовая скорость осадконакопления в озере составила 0.4 мм/год. После спуска палеоозера на осушенных участках началось многолетнее промерзание рыхлых отложений, активное сегрегационное и инъекционное льдообразование, формирование минеральных бугров пучения (литальса) и криогенных форм рельефа (Vasil'chuk et al., 2016).

За семь лет наблюдений (2016-2022 гг.) в долине р. Сенца среднегодовая температура воздуха повысилась на 0.5 °C (рис. 1).

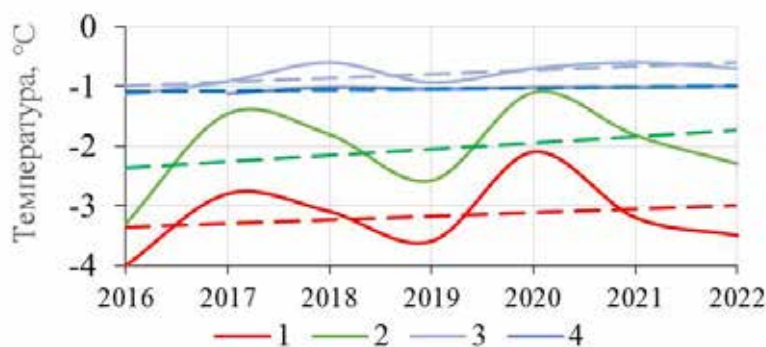


Рисунок 1. Изменение среднегодовой температуры воздуха в долине р. Сенца по данным метеостанции Орлик (1), по данным авторов (2) и среднегодовой температуры рыхлых отложений на глубине 1 м (3) и 5 м (4).

Среднегодовая температура пород на глубине 1.0 и 5.0 м также имеет положительный тренд (+0.4 и +0.1 °С соответственно). На глубине 10 м среднегодовая температура пород за период наблюдений сохранялась равной (–1.0 °С). Конфигурация термоизоплант –1.0 и –2.0 °С в толще многолетнемерзлых пород свидетельствует о постепенном повышении температуры рыхлых отложений в слое годовых теплооборотов, что соответствует устойчивому многолетнему росту среднегодовой температуры воздуха на Окинском плато (рис. 2).

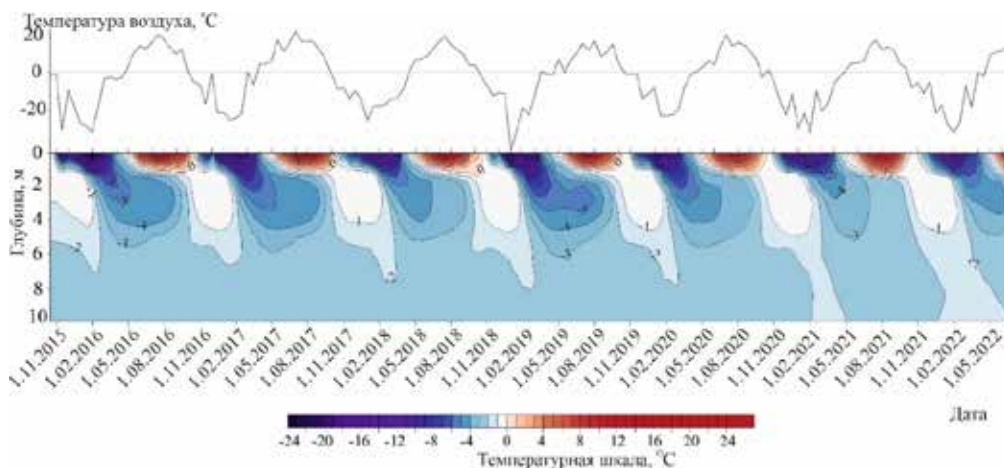


Рисунок 2. Тепловое состояние рыхлых отложений в долине р. Сенца в 2016–2022 гг.

Наибольшая мощность слоя сезонного протаивания (1.8 м) зафиксирована во второй половине августа на открытом возвышенном пространстве, наименьшая (0.8 м) – в заболоченной котловине с характерным кочкарным микрорельефом.

Рост среднегодовой температуры воздуха и повышение температуры рыхлых отложений в слое годовых теплооборотов на Окинском плато провоцируют деградацию мерзлых пород с поверхности и разрушение бугров пучения. Генерация фотографий высокого разрешения, полученных во время полетов дистанционно пилотируемого летального аппарата, дали возможность оценить темпы разрушения бугров пучения и береговой линии в долине р. Сенца. Наибольшее изменение морфологии ландшафта обусловлено оттаиванием сильно льдистых ($W_{вес} = 78\%$) пылеватых суглинков, последующим переходом их в текучее состояние, что приводит формированию блоков отседания в уступах террасы р. Сенца. Дополнительным фактором, способствующим разрушению бугров пучения, является ветровая эрозия (активное развевание пылеватых суглинков) и речная боковая термоэрозия. За пять лет инструментальных наблюдений бровка террасы р. Сенца за счет термоэрозии отступила более чем на 3.0 м.

Литература

Олюнин В.Н. Неотектоника и оледенение Восточного Саяна. – М.: Наука, 1965. – 127 с.

Гросвальд М.Г. Последнее оледенение Саяно-Тувинского нагорья: морфология, интенсивность питания, подпрудные озера // Взаимодействие оледенения с атмосферой и океаном. – М.: Наука, 1987. – С. 151–171.

Аржанников С.Г., Броше Р., Жоливе М., Аржанникова А.В. К вопросу о позднеплейстоценовом оледенении юга Восточного Саяна и выделении конечных морен MIS 2 на основе бериллиевого датирования (^{10}Be) ледниковых комплексов // Геология и геофизика. – Т. 56, № 11. – 2015. – С. 1917–1933.

Vasil'chuk Yu.K., Alexeev S.V., Arzhannikov S.G., Alekseeva L.P., Budantseva N.A., Chizhova Ju N., Arzhannikova A.V., Vasilchuk A.C. Lithals in the Sentsa river valley, Eastern Sayan Mountains, Southern Russia // Permafrost and Periglacial Processes. Vol. 27, Issue 3 – 2016 – Pp. 285-296.

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ КОЛЫМСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

В.В. Андреева*, В.В. Спектор, П.Я. Константинов

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

** varvara-andreev@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследований динамики температурного режима многолетнемерзлых пород слоя годовых теплооборотов на Северо-Востоке Колымской низменности на примере четырех мониторинговых площадок, расположенных на склоновой, межлассной и пойменной поверхностях за период с 2018 по 2022 гг.

Ключевые слова: температурный режим, многолетнемерзлые породы, Колымская низменность, слой годовых теплооборотов.

TEMPERATURE DYNAMICS OF PERMAFROST IN NORTH-EAST KOLYMA LOWLAND

V. V. Andreeva*, V. V. Spektor, P.Y. Konstantinov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

** varvara-andreev@mail.ru*

Abstract. The work presents the results of studying the temperature regime of permafrost in the layer of annual turnover in the Northeast of the Kolyma Lowland. Observations are carried out on four monitoring sites located in various landscapes for the period from 2018 to 2022.

Keywords: temperature regime, permafrost, Kolyma lowland, layer of annual turnover.

Наблюдения за температурным режимом мерзлых пород проводятся на межлассном, склоновом и пойменном типах местности в Нижнеколымском районе. Объектами исследований являются грунты слоя годовых теплооборотов до глубин 10–21 м. Отложения на межлассье и склонах до глубины 10 м представлены в основном темно-серыми тонкозернистыми алевритами ледового комплекса; пойменные отложения представляют собой толщу разнозернистых песков с включением гальки в нижней части разреза (глубина скважины – 21 м). Измерение температур грунтов выполняются в скважинах, оборудованных четырехканальными автоматическими логгерными системами Onset Hobo; датчики установлены на глубинах: 3, 5, 7, 10 м – для скважин глубиной 10 м и 4, 10, 14, 21 м – для скважины глубиной 21 м.

Площадка, расположенная на пологой межлассной поверхности, где растительность представлена лиственничным лесом, карликовыми березами, единичными ивами и сплошным моховым покровом (рис. 1, а), температурный режим характеризуется стабильностью. Мощность сезонно-талого слоя составляет 1 м. Температура грунтов на

глубине 10 м в период 2018–2022 гг. варьировалась в пределах $-3,4\dots-5,4$ °С. Среднегодовые значения температуры на этой глубине изменялись за пятилетний период в диапазоне $-4,1\dots-4,7$ °С.

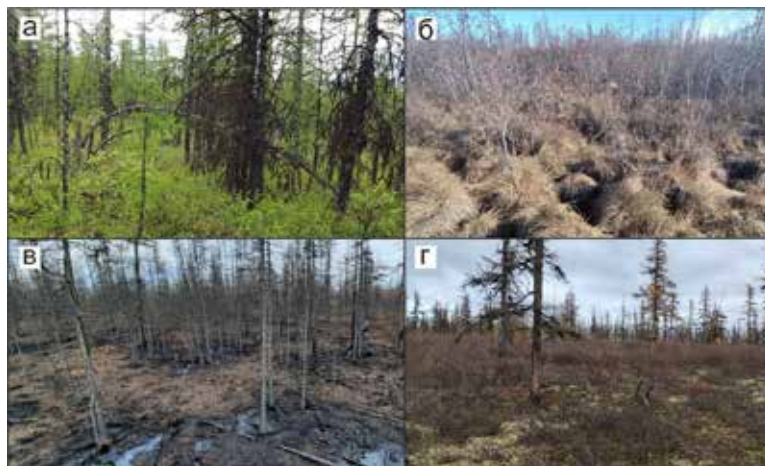


Рисунок 1. Общий вид мониторинговых площадок. а – межаласье; б – пойма; в – южный склон, свежая гарь; г – межаласье.

Площадка, расположенная на заливаемой пойменной поверхности протоки Амболиха (рис 1, б), где отсутствует древесная растительность, обильны кустарники, а на поверхности развит осоковый кочкарник, характеризуется сравнительно низкими значениями температур грунтов. В период с 2020 по 2022 гг. отмечается тренд на охлаждение мерзлых пород. Среднегодовые значения температур грунтов на глубине 14 м в 2020 г. составили $-5,4$ °С, а к 2022 г. – минус $5,9$ °С. Максимальная глубина сезонного протаивания грунтов не превышает 0,4 м.

На площадке, расположенной на склоне южной экспозиции (рис. 1, в), где летом 2020 г. произошел лесной пожар, наблюдается повышение температур грунтов на всех наблюдаемых глубинах. К примеру, температура пород на глубине 3 м опустилась в конце апреля 2021 г. до значений $-4,6$ °С, а в апреле 2022 г. этот показатель повысился более чем на 2 °С и составил $-2,2$ °С. На глубине 10 м температура изменялась в диапазоне $-2,1\dots-2,6$ °С в период 2020–2022 гг. Также наблюдается увеличение мощности сезонно-талого слоя, в 2020 г. она составила 0,7 м, а к 2022 году – 1,15 м.

Растительность на мониторинговой площадке, расположенной на межаласье (рис 1, г), представлена разреженной лиственницей, обилием кустарничков голубики, багульника и брусники. Эта площадка характеризуется стабильностью температурного режима. Температура грунтов на глубине 10 м в период 2020–2022 гг. варьировала в диапазоне $-2,0\dots-2,3$ °С, отмечается незначительное понижение температур пород. Мощность сезонно-талого слоя практически неизменна и составляет 0,7 м.

На основании полученных данных установлено, что температура горных пород на подошве слоя годовых теплооборотов на исследуемых участках варьирует от $-2,0$ до $-5,9$ °С. В целом температура мерзлых пород в исследуемом районе, сохраняет некоторую стабильность за период наблюдений. Небольшие изменения температур грунтов связаны с микроклиматическими событиями и с особенностями мерзлотно-ландшафтных условий. Исключением являются площадки, расположенные на местах современных лесных пожаров, где происходит стремительное изменение температурного поля, вследствие нарушения растительного покрова и водно-теплого режима на поверхности, а также площадки, расположенные в пределах заливаемых пойм.

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

ДИНАМИКА ПОДВОДНОЙ МЕРЗЛОТЫ В ПРИБРЕЖНО-ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ МОРЕЙ ЛАПТЕВЫХ И ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО

М.Н. Григорьев*

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

**grigoriev@mpi.ysn.ru*

Аннотация. Проведенные исследования позволили нам выявить важные особенности развития подводной мерзлоты в прибрежно-шельфовой зоне морей Восточной Сибири. Выявлена сложная структура верхних горизонтов субаквальной мерзлоты, мерзлое состояние которых на многих участках нестабильно в силу существования локальных геотермических, гидрогеологических и тектонических аномалий. Придонная и береговая криогенные системы в пределах подводного берегового склона довольно тесно взаимодействуют друг с другом. Установлены средний уклон кровли подводной мерзлоты, обычно понижающейся в сторону увеличения глубин моря, а также средние темпы ее понижения вследствие температурной и солевой деградации многолетнемерзлых пород под морем. Очевидных изменений темпов деградации субаквальных многолетнемерзлых пород в прибрежной зоне арктических морей в связи с климатическими изменениями в Арктике пока обнаружить не удалось.

Ключевые слова: подводная мерзлота, уклон кровли мерзлоты, деградация подводной мерзлоты.

SUBSEA PERMAFROST DYNAMICS IN THE COASTAL-SHELF ZONE OF THE LAPTEV AND EAST SIBERIAN SEAS

M.N. Grigoriev *

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

**grigoriev@mpi.ysn.ru*

Abstract. The conducted studies allow us to identify important features of the development of subsea permafrost in the coastal-shelf zone of the East-Siberia seas. The complicated structure of the upper horizons of subsea permafrost has been revealed, the frozen state of which is unstable in many areas due to the existence of local geothermal, hydrogeological and tectonic anomalies. The bottom and costal cryogenic systems within the subsea shoreface profile slope interact quite closely with each other. The average subsea permafrost table inclination, usually decreasing in the direction of increasing sea depths, as well as the average rate of its decrease, due to temperature and salt degradation of permafrost under the sea, have been established. Evident changes in the rate of degradation of subsea permafrost table in the coastal zone of the Arctic seas, due to climate change in the Arctic, have not yet been detected.

Keywords: subsea permafrost, Subsea permafrost inclination and dynamics.

Подводная мерзлота (субаквальные многолетнемерзлые породы) в арктических морях изучена довольно слабо. Она неплохо исследована лишь в пределах подводного берегового склона и на отдельных участках протяженностью в первые десятки километров, где имеются буровые профили. Весьма динамичное преобразование льдистых многолетнемерзлых пород в мелководной зоне шельфа – одно из важных особенностей природной среды исследуемого региона. На относительно приглубом шельфе мощность и границы распространения подводной мерзлоты практически неизвестны. Фактически, имеются материалы лишь по нескольким десяткам относительно глубоких (30–80 м) буровых скважин, вскрывших подводную мерзлоту под дном морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Следует отметить, что почти все эти скважины приурочены к прибрежной, весьма мелководной зоне моря. Во многих случаях здесь были обнаружены реликтовые континентальные многолетнемерзлые породы, погруженные под море в результате отступления берегов и частичного оттаивания в подводных условиях.

Данные, полученные по немногочисленным буровым профилям на прибрежном мелководье, показывают значительные вариации в уклонах поверхности и темпах деградации мерзлоты сверху. Верхние горизонты субаквальной мерзлоты имеют довольно «высокую» температуру – от -1 до $-1,5$ °С уже в первых километрах от берега.

Выявлена сложная структура верхних горизонтов субаквальных многолетнемерзлых пород, мерзлое состояние которых на многих участках нестабильно в силу существования локальных геотермических, гидрогеологических и тектонических аномалий. Наземная (береговая) криогенная система и донная (верхние горизонты СММП на подводном береговом склоне) динамически тесно зависимы друг от друга. Особенности эволюции верхних горизонтов СММП зависят от ряда факторов: темпов отступления или выдвижения берегов, температурного режима и солености придонной воды, уклонов подводного берегового профиля, морфологии береговой зоны и конфигурации береговой линии, степени открытости к морскому влиянию, характера осадков, слагающих берег и подводный береговой склон, льдистости СММП, особенностей гидро- и литодинамических параметров.

Установлено, что средний уклон (от берега) кровли подводной мерзлоты в прибрежно-шельфовой зоне морей Восточной Сибири – $0,011$ ($0,62^\circ$). Диапазон уклонов – $0,0002$ – $0,1$. Установлено также, что скорость деградации верхних горизонтов реликтовых субаквальных многолетнемерзлых пород (СММП) составляет первые десятки сантиметров в верхней части подводного берегового склона, уменьшаясь до первых миллиметров в год в нижней его части. Она определяется динамическим режимом береговой зоны, составом, строением и мощностью залегающих на кровле мерзлоты осадков, температурой и соленостью придонного слоя воды.

В исследуемой прибрежной зоне СММП были обнаружены на многих участках: в Восточном Таймыре, Хатангском заливе, бухте Кожевникова, мысе Нордвик, мысе Мамонтов Клык, авандельтах Лены и Яны, Быковском п-ове, о. Муостах, губе Буор-Хая, Сиэлляхском заливе, Ванькиной губе, мысе Святой Нос, вокруг Большого и Малого Ляховских островов в Колымском заливе и на других участках. Наиболее исследованным районом в отношении СММП является пролив Дмитрия Лаптева. Большинство скважин здесь фиксируют кровлю СММП на глубинах от 5 до 50 и более метров.

Новообразованные субаквальные мерзлые породы формируются в пределах мелководий авандельт и в мелководных заливах, где развиты процессы аккумуляции осадков при глубинах воды менее 2 м.

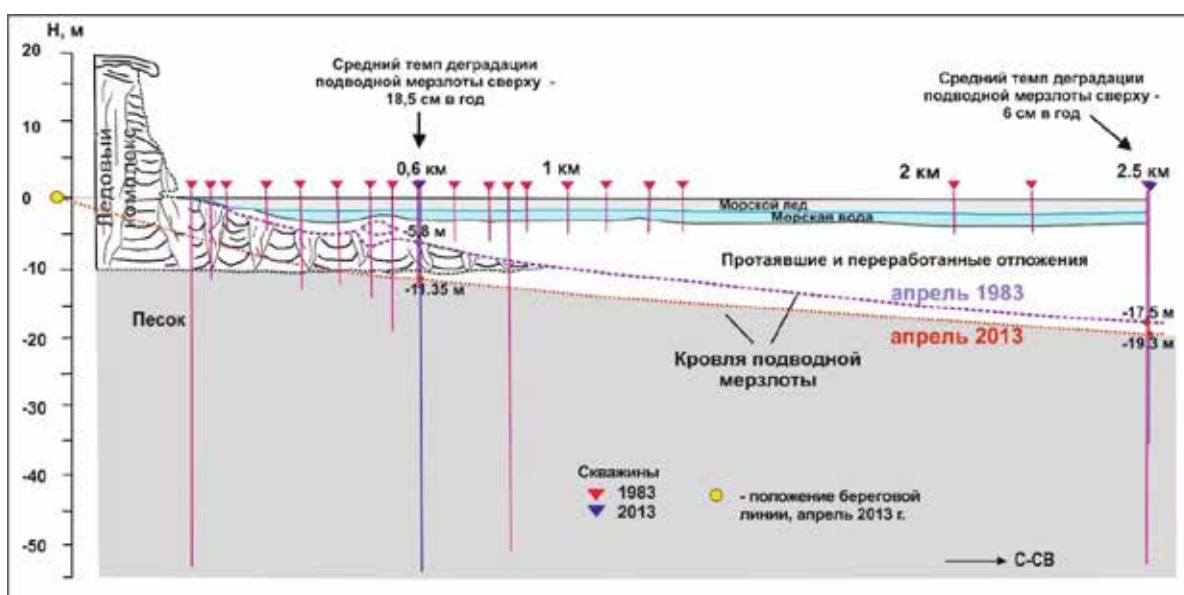


Рисунок 1. Изменение положения кровли подводной мерзлоты у северного мыса о-ва Муостах (губа Буор-Хая, море Лаптевых) по данным двух буровых профилей 1983 г. (выполнялся ИМЗ СО РАН) и 2013 г. (выполнялся ТОИ ДВО РАН, ИМЗ СО РАН, МГУ, ИО РАН).

Подводная реликтовая мерзлота распространена на большей части подводного склона в прибрежно-шельфовой зоне морей Восточной Сибири. Особенно широкое развитие она имеет в районах береговых сегментов, где береговая эрозия активна.

Очевидных изменений темпов деградации субаквальных многолетнемерзлых пород в прибрежной зоне арктических морей в связи с климатическими изменениями в Арктике пока обнаружить не удалось.

Практическое значение исследований подводной мерзлоты связано с уточнением изменения батиметрии прибрежных фарватеров (просадки дна при деградации льдистых СММП), с выявлением инженерной основы для любых видов работ на шельфе, а также с поиском газоконденсатных месторождений на шельфе.

Исследование выполнено при финансовой 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», а также гранта РНФ 21-17-00054 «Четвертичный эоловый рельеф и покровные отложения бассейна р. Лены (Восточная Сибирь): строение, возраст, палеогеографическое значение».

МОРЕННЫЕ ПЬЕДЕСТАЛЫ – ФЕНОМЕН ГОРНОЙ МЕРЗЛОТЫ

М.Д. Докукин*, М.Ю. Беккиев, Р.Х. Калов

Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия

** inrush@bk.ru*

Аннотация. В горах кроме известных форм мерзлоты – каменных глетчеров – встречаются массивы в форме языкообразных моренных пьедесталов, которые могут быть покрыты ледниками, а также без ледников на их поверхности. Генезис моренных пьедесталов определяется динамикой ледников, насыщенных обломочным материалом, с режимом неоднократных подвижек и наложением отложенных масс друг на друга в виде многослойной ледово-обломочной толщи. Актуальность изучения моренных пьедесталов определяется развитием в них селевых процессов с выносом гигантских объёмов обломочного материала. В статье приводятся данные о максимальных селепроявлениях, связанных с деградацией моренных пьедесталов, с объёмами выносов от нескольких млн м³ до нескольких сотен млн м³.

Ключевые слова: моренный пьедестал, селевой поток, селевой врез, селевые отложения, сход ледника.

MORAINE PEDESTALS – THE PHENOMENON OF MOUNTAIN PERMAFROST

M.D. Dokukin*, M.Yu. Bekkiev, R.Kh. Kalov

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia

** inrush@bk.ru*

Abstract. In the mountains, in addition to the well-known forms of permafrost – rock glaciers – there are massifs in the form of tongue-shaped moraine pedestals that can be covered with glaciers, as well as existing without glaciers on their surface. The genesis of moraine pedestals is determined by the dynamics of glaciers saturated with debris material, with a regime of repeated movements and the superposition of deposited masses on top of each other in the form of a multilayer ice-debris mass. The relevance of studying moraine pedestals is determined by the development of debris flow processes in them with the removal of giant volumes of debris material. The article provides data on the maximum debris flows associated with the degradation of moraine pedestals, with volumes of deposited masses from several million m³ to several hundred million m³.

Keywords: moraine pedestal, debris flow, debris flow cut, debris flow deposits, glacier detachment.

В последние годы вследствие изменения климата происходит ускоренное таяние горных ледников и массивов горной мерзлоты. Это вызывает активизацию опасных природных процессов (селевые потоки, прорывы озёр, ледово-каменные лавины, сходы ледников). Горная мерзлота представлена массивами, содержащими погребённые ледниковые льды и льды другого происхождения. В зависимости от содержания льда и его происхождения, а также от объёмов массивов мерзлоты, процессы, зарождающиеся в них, имеют различную степень опасности. Катастрофические селепроявления в каменных глетчерах охарактеризованы в работе (Докукин и др., 2020). Особое внимание селепроявлениям в моренных пьедесталах (языкообразных массивах толщиной до 50–70 м с большим содержанием льда, ограниченных с боков береговыми моренами) уделено в

работах (Беккиев и др., 2021; Докукин и др., 2016; Докукин и др., 2019). Вынос гигантских объёмов обломочного материала из моренных пьедесталов обусловлен особенностями генезиса и внутреннего строения: моренные пьедесталы образуются в результате многочисленных подвижек насыщенных обломками ледников и наложения отложенных масс друг на друга. Последствиями селевых процессов, продолжавшихся в течение несколько суток и недель, являются селевые врезы, хорошо распознаваемые на аэрофото- и космических снимках (рис. 1).

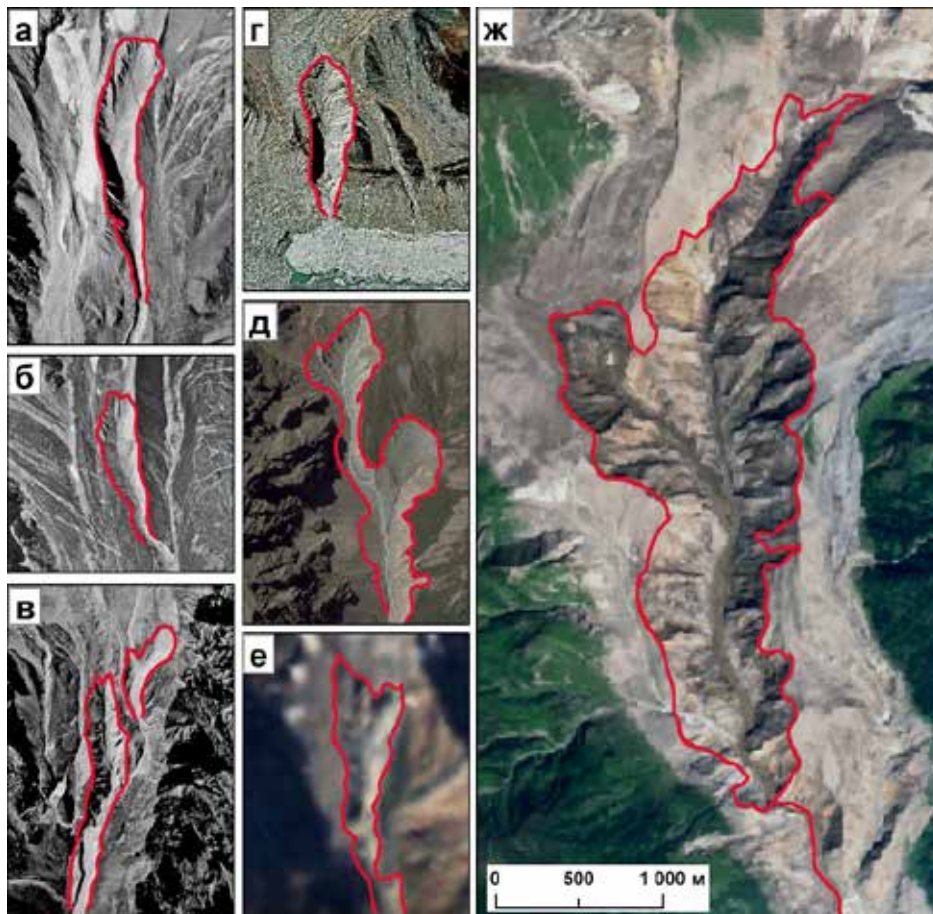


Рисунок 1. Селевые врезы на моренных пьедесталах: а – долина р. Тютюнсу (левый приток р. Черек-Балкарский, аэрофотоснимок 1957 г.), б – долина р. Джаловчат (левый приток р. Адырсу, бассейн р. Баксан, аэрофотоснимок 1957 г.), в – долина правого притока р. Сонгутидон (правый приток р. Урух, аэрофотоснимок 1959 г.), г – долина р. Бхагиратхи (исток р. Ганг, Гималаи, космоснимок 07.10.2017 Google Earth), д – долина р. Жарсай (левый приток р. Иссык, Заилийский Алатау, космоснимок 27.08.2012 Bing Maps, WorldView-2), е – долина р. Дарайпшихарв (правый приток р. Пяндж, Памир, космоснимок 22.08.1988 Landsat 5), ж – долина р. Седонгпу (левый приток р. Ярлунг Цангпо, Тибет, космоснимок 20.09.2021 Sentinel-2). Все фрагменты в одном масштабе.

В работах (Ковалёв, 1957; Тукаев, 2002) приведены данные непосредственных наблюдений селевых потоков при формировании врезов в долинах рек Адырсу и Дарайпшихарв (рис.1 б, е). Временные интервалы процессов, а также облик моренных пьедесталов и их форм, переходных к коллювиальным образованиям, до формирования в них врезов приведены в работах (Беккиев и др., 2021а, Беккиев и др., 2021б). В некоторых

работах приведены количественные данные об объёмах выносов из моренных пьедесталов: из массива в балке Джаловчат в долине р. Адырсу – 3 млн м³ (Ковалёв, 1957) (рис. 1, б), в долине р. Тютюнсу – ориентировочно более 4 млн м³ (Докукин и др., 2016) (рис. 1, а), из Жарсайских воронок в долине р. Иссык – до 6 млн м³ (Виноградов, 1977) (рис. 1, д), из моренного пьедестала ледника Меру Бамак в долине р. Бхагиратхи – 6,5 млн м³ (отложения), около 8 млн м³ (объём вреза) (Kumar et al., 2019) (рис. 1, г).

Характерной особенностью селевых процессов в моренных пьедесталах является их непрерывность. Сам процесс разжижения масс пьедестала занимает длительный период, что обусловлено отсутствием дренажа талых вод от таяния внутреннего льда по причине наличия водонепроницаемых моренных перегородок, отделяющих отложения разных подвижек. Эти перегородки разрушаются последовательно, по мере развития процесса, инициированного незначительным внешним воздействием или сползанием одного из участков. В итоге за один селевой процесс выносятся весь объём пьедестала, заключённый между ограничивающими его береговыми моренами. Фактически, моренные пьедесталы являются потенциальными селевыми массивами. С некоторыми нюансами объём отложений будущего селевого процесса можно определить исходя из объёма пьедестала. В результате мониторинга процессов в зоне горной мерзлоты был выявлен максимальный объём селевых выносов из моренного пьедестала ледника Седонгпу в Тибете в 2021 г. (рис. 1, ж) (Докукин и др., 2021a). По данным (Kääb, Girod, 2022) он составил около 335 млн м³. То, что этому грандиозному селевому процессу предшествовал сход ледника в 2018 г. объёмом 130 млн м³ (Kääb et al., 2021), позволяет оценивать селевую опасность моренных пьедесталов, ещё покрытых ледниками, и предполагать возможное их влияние на сходы ледников в будущем.

Литература

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Шагин С.И. Экстремальные селепроявления на моренных пьедесталах в 2018–2021 гг. (по материалам дистанционного зондирования Земли) // ГеоРиск. – Т. XV, № 3. – 2021а. – С. 40–48.

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Федченко Л.М. Формирование селевых врезов на участках береговых морен долинных ледников // Вестник Владикавказского научного центра. – 2021б. – Т. 21, № 3. – С. 48–55.

Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 155 с.

Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А. Моренные пьедесталы – очаги формирования катастрофических гляциальных селей // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита : материалы IV Международной конференции. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. – С. 67–71.

Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Запороженко Э.В., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р. Барсемская селевая катастрофа на Памире в 2015 году и ее аналоги на Центральном Кавказе // ГеоРиск. – 2019. – Т. 13, № 1. – С. 26–36.

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Каменные глетчеры – очаги формирования катастрофических селей // ГеоРиск. – 2020. – Т. 14, № 2. – С. 52–65.

Ковалёв П.В. Геоморфологические исследования в Центральном Кавказе (бассейн р. Баксан). – Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1957. – 162 с.

Тукеев О.В. Селевые явления Памира: катастрофы, закономерности, прогноз. – М., 2002. – 176 с.

Kääb A., Jacquemart M., Gilber A., Leinss S., Girod L., Huggel Ch., Falaschi D., Ugalde F., Petrakov D., Chernomorets S., Dokukin M., Paul F., Gascoin S., Berthier E., S. Kargel J. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers – more frequent than thought? // *Cryosphere*. Vol. 15, no. 4 – 2021 –. Pp 1751–1785.

Kääb A., Girod L. Brief Communication: Rapid $\sim 335 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bed erosion after detachment of the Sedongpu Glacier (Tibet) // *The Cryosphere*. 2022. Discuss. [preprint]. <https://doi.org/10.5194/tc-2022-237>

Kumar A., Bhambri R., Tiwari S.K., Verma A., Gupta A.K., Kawishwar P. Evolution of debris flow and moraine failure in the Gangotri Glacier region, Garhwal Himalaya: Hydro-geomorphological aspects // *Geomorphology*. Vol. 333 – 2019 – Pp. 152–166.

АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ ДЛЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМПЛЕКСНОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ МАСШТАБА 1:1 000 000

Д.С. Дроздов^{1,2,3,4*}, Г.В. Малкова^{1,2}, Ю.В. Коростелев^{1,2}, Д.В. Сироткин²,

Е.И. Пижанкова^{2,5}, А.А. Попова⁶, Е.В. Устинова^{1,3,7}

1 – Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия

2 – ФГБУ «Гидроспецгеология», г. Москва, Россия

3 – Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

4 – Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ), г. Москва, Россия

5 – Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

6 – ООО «Северные изыскания», г. Москва, Россия

7 – Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

* ds_drozhdov@mail.ru

Аннотация. В целях поддержки социально-экономического развития Арктической зоны путем изучения и оценки геоэкологической обстановки на территориях интенсивного хозяйствования и проведения детальных исследований и мониторинга на вновь осваиваемых площадях Минприроды РФ приступило к государственному гидрогеологическому и инженерно-геологическому картографированию северных регионов России в масштабе 1:1 000 000. Геокриологический блок является существенной составляющей инженерно-геологической информации, подлежащей картографированию. Разрабатывается методика ее отображения на геосистемной (ландшафтной) основе с учетом предыдущего опыта крупномасштабного картографирования.

Ключевые слова: геокриологические условия, картирование, геосистемный подход, ландшафтная индикация.

INTEGRATION OF THE GEOCRYOLOGICAL SURVEY INTO THE FEDERAL HYDROGEOLOGICAL AND ENGINEERING-GEOLOGICAL MAPPING ON A SCALE OF 1:1,000,000

D.S. Drozdov^{1,2,3,4*}, G.V. Malkova^{1,2}, Y.V. Korostelev^{1,2}, Sirotkin²,

E.I. Pizhankova^{2,5}, A.A. Popova⁴, E.V. Ustinova^{1,3,7}

1 – Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Center of the SB RAS, Tyumen, Russia

2 – Federal State Budgetary Institution Hidrospetsgeologiya, Moscow, Russia

3 – Tyumen State University, Tyumen, Russia

4 – Russian State Geological Prospecting University (MGRI), Moscow, Russia

5 – Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

6 – LLC "Northern Surveys", Moscow, Russia

7 – Tyumen industrial University, Tyumen, Russia

* ds_drozhdov@mail.ru

Abstract. The Ministry of Natural Resources of the Russian Federation has started a federal program of hydrogeological and engineering-geological mapping of the Russian northern regions on a scale of 1:1 000 000 in order to support of socio-economic development of the Arctic Zone by study and assessment of mineral deposits and conducting of detailed research and monitoring in new industrial areas. The geocryology is the main block of engineering-geological information to be mapped and the methodology for its drawing up is being developed on the geosystem (landscape) basis adapting previous experience large scale mapping.

Keywords: geocryological conditions, mapping, geosystem approach, landscape indication.

В большинстве случаев для построения разномасштабных геокриологических карт, как пространственных картографических моделей криолитозоны, служит представление о иерархической структуре геосистем и ее увязке с иерархией геологических тел, образующих литогенную основу геосистем. Фактографическую основу составляют базы данных геокриологической информации. Такая картографическая модель обязана для любой точки территории с заданной точностью и надежностью давать информацию о текущих условиях, а также быть основой для мониторинга и прогноза изменений геокриологических параметров. Геокриологические карты можно привязать к нескольким содержательным иерархическим уровням, содержащим последовательно всё более детальную информацию – обзорному, глобальному (материковому), региональному, локальному, объектному (*Цифровые...*, 2018).

Рассматриваемые карты масштаба 1:1 000 000 относятся к региональным (которые характеризуют крупные природные регионы и административные единицы в масштабах 1:500 000 ... 1:5 000 000) и должны отображать как общие закономерности распределения геокриологических и смежных характеристик в их зависимости от широтных, секторальных и геоструктурных гипсометрических и природно-климатических факторов, так и специфические региональные признаки, существенные для экономики и социальной структуры региона. Соответственно отображается широкий набор геокриологических характеристик, включая прогнозные.

Вопрос пространственно-временной интерполяции геокриологических данных решён с помощью геосистемного подхода, давно применяемого при крупно- и среднемасштабных инженерно-геокриологических работах (*Методическое...*, 1978). Геосистемы Севера визуально хорошо узнаваемы как на местности, так и в материалах дистанционного зондирования. Они идентифицируются как участки приповерхностной геологической среды с определёнными свойствами (состав, состояние, температура, прочность, пр.) и со сформированными на ней рельефом, покровами (почвы, биота, водные объекты), объектами хозяйствования. Последовательное разделение иерархии геосистем на всё более мелкие таксоны позволяет на каждом этапе более детально описывать геологическую среду с присущими ей параметрами (*Цифровые...*, 2018).

В текущем году коллектив участвовал в комплексном картировании группы листов масштаба 1:1 000 000 на стыке европейского и западносибирского Севера в части геокриологических условий. Один из листов, Q-41 (Воркута) подготовлен к изданию (рисунок). Авторы столкнулись с ситуацией «плохой читаемости» формируемого в традиционной легенде мелкомасштабного синтетического геокриологического листа, в то время как вариант полистного покомпонентного отображения геокриологической информации, принятый при составлении рабочих материалов, оказался неприемлем с точки

зрения издательства, ориентированного на количество основных тематических листов. Поэтому осуществлён итерационный подбор оптимального соотношения информативности и удобства восприятия основной геокриологической карты и её вариантов, а при этом цифровая версия карты позволяет использовать материал в максимально информативном виде, включая прогностические построения на основе глобальных и региональных мониторинговых наблюдений (Malkova et al., 2022; Динамическая..., 2022).

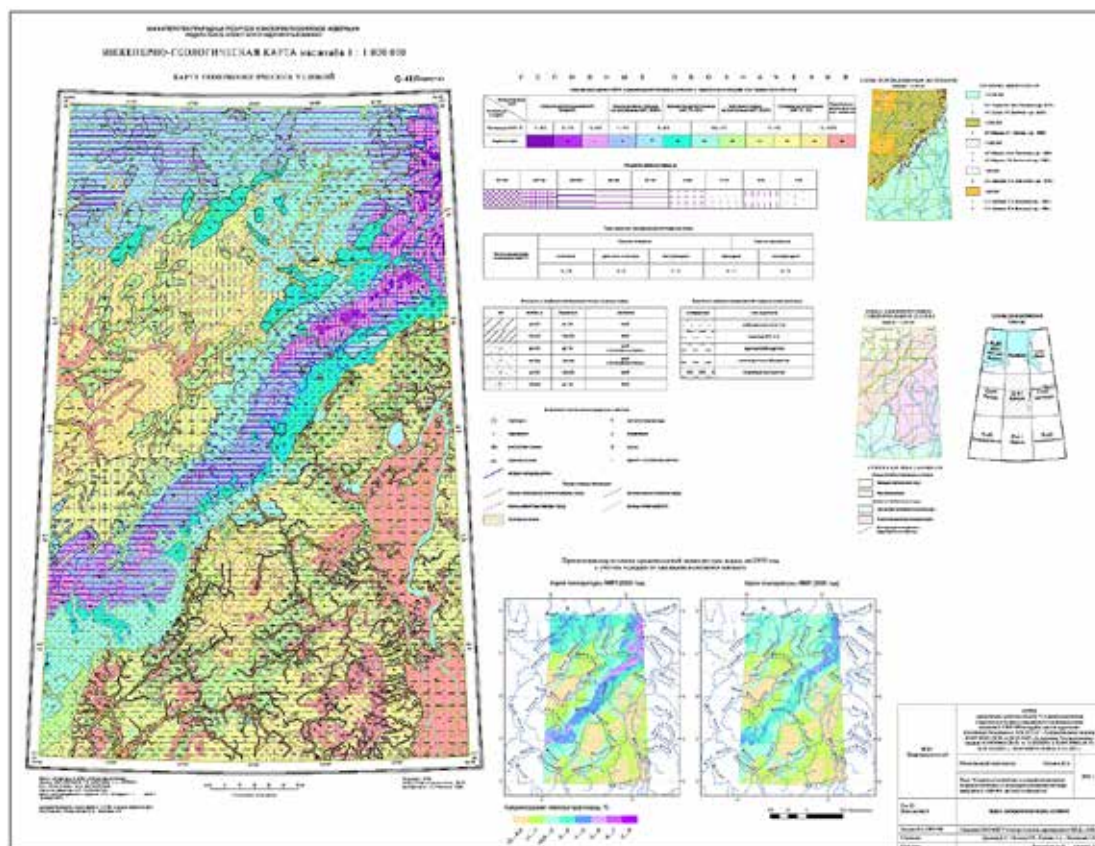


Рисунок 1. Образ синтетической геокриологической карты листа Q41 (Воркута) масштаба 1:1 000 000 с зарамочным оформлением. В центре внизу две врезки с текущими и прогнозными (на 2050 г.) значениями температуры ММП (Динамическая..., 2022).

Работа выполнена по Госзаданиям № 049-00019-21-00 и № 121041600042-7 по бюджетному Проекту IX.133.1.1 при поддержке Администрации ЯНАО.

Литература

Динамическая карта температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в период 1960–2100 годов / Бердников Н.М., Малкова Г.В., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Гравис А.Г., Пономарева О.Е. // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне», МГУ им. М.В. Ломоносова, 14 – 17 июня 2022 г. : сборник статей [электронное издание сетевого распространения] / Под редакцией Р.Г. Мотенко. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. – 1130 с. табл., ил. – URL: <https://bookonlime.ru/node/44945> – doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130. С. 515-519.

Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200 000 (1:100 000–1:500 000) / Под ред. Е.С. Мельникова. – М.: Недра, 1978. – 391 с.

Цифровые карты криолитозоны и оценка современных изменений в криолитозоне / Дроздов Д.С., Малкова Г.В., Романовский В.Е., Васильев А.А., Брушков А.В., Лейбман М.О., Садуртдинов М.Р., Пономарева О.Е., Пендин В.В., Горобцов Д., Устинова Е.В., Коростелев Ю.В., Стрелецкий Д.А., Слагода Е.А.,

Скворцов А.Г., Гравис А.Г., Бердников Н.М., Орехов П.Т., Лаухин С.А., Царёв А.М., Фалалаева А.А., Железняк М.Н. // «Актуальные пробл. геокриологии», МГУ, 15-16 мая 2018. – М.: Университетская книга, 2018. – Т. 1. – С. 295–301.

Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Nikitin K., Orekhov P., Ponomareva O., Romanovsky V., Sadurtdinov M., Shein A., Skvortsov A., Sudakova M., Tsarev A. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // *Energies*, 2022, V.15, N.7, art.2311. – Basel, Switzerland: MDPI, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15072311>

ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТРАНСФОРМАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СЛОЕВ МЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ

В.Н. Ефремов*

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

**vne@mpi.ysn.ru*

Аннотация. Придавая значение промороженности грунтов, предлагается количественно оценивать ее по их льдистости. Рассматривается 3-х слойная модель грунтов с промежуточным слоем переходной промороженности, льдистость которого и предлагается оценивать по измерениям кажущегося сопротивления и фазы поверхностного импеданса. Рассматривается полученное изменение геоэлектрического строения песчаных грунтов на стационарном пункте во временном ряду с 05.11.2008 по 12.10.2010.

Ключевые слова: слой переходной промороженности, льдистость, геоэлектрическое строение, временной ряд.

GEOPHYSICAL ASSESSMENT OF TRANSFORMATION OF NON-STATIONARY LAYERS IN PERMAFROST

V.N. Efremov*

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

**vne@mpi.ysn.ru*

Abstract. Attaching importance to the frostiness of soils, it is proposed to quantify it by their iciness. A 3-layer model of soils with an intermediate layer of transitional frost is considered, the iciness of which is proposed to be estimated by measurements of apparent resistance and the phase of surface impedance. The obtained change in the geoelectric structure of sandy soils at a stationary point in the time series from 05.11.2008 to 12.10.2010 is considered.

Keywords: transitional frost layer, iciness, geoelectric structure, time series.

Актуальна оценка промороженности дисперсных грунтов, как результат их промерзания либо растепления, оцениваемый нами по их льдистости. Выполнить количественную оценку льдистости позволяют зондирования методами электроразведки (Ефремов, 2013; Ефремов, 2022). При этом, интересуют льдистость всех слоев модели толщи мерзлых дисперсных грунтов, состоящей из следующих слоев: 1) деятельный слой; 2) слой переходной промороженности; 3) опорный слой стационарной промороженности.

Численное моделирование частотной зависимости кажущегося сопротивления и фазы поверхностного импеданса для вариантов параметров модели толщи мерзлых дисперсных грунтов позволяет получить изменение их геоэлектрического строения в виде ряда (рис. 1).

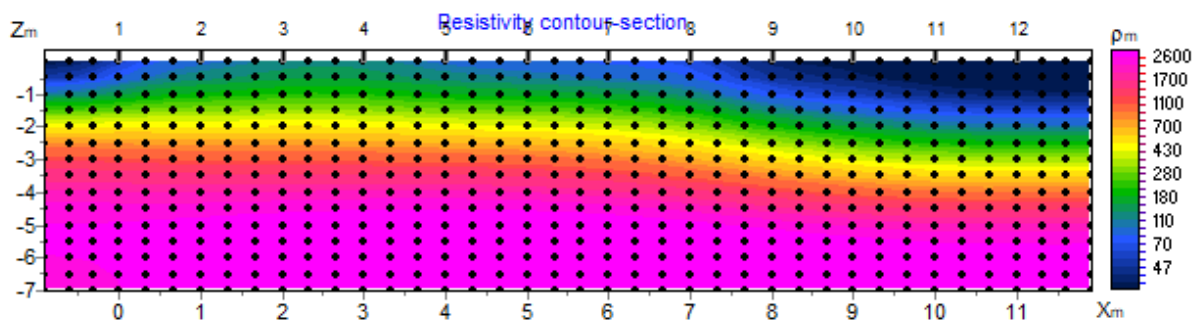


Рисунок 1. Синтезированный геоэлектрический разрез ряда для пяти моделей состояния грунтов: 1-2 – среднепромороженное, 3-4 – максимально промороженное, 5-6 – среднепромороженное, 7-8 – минимально-промороженное, 9-10 – аномально-растепленное I типа, 11-12 – аномально-растепленное II типа.

Из рис. 1 видно, что моделируемое аномальное растепление грунтов деятельного слоя ведет к росту его мощности и погружению слоя переходной промороженности в глубину.

Измерения температуры песчаных грунтов показывают, что ее изменения наиболее заметно происходят на глубине до 1,5 м (рис. 2). Однако на больших глубинах для грунтов слоя переходной промороженности они хотя и не велики, но имеют большое значение в летнее время ввиду близости к 0 °С – границе фазового перехода содержащейся в них влаги.

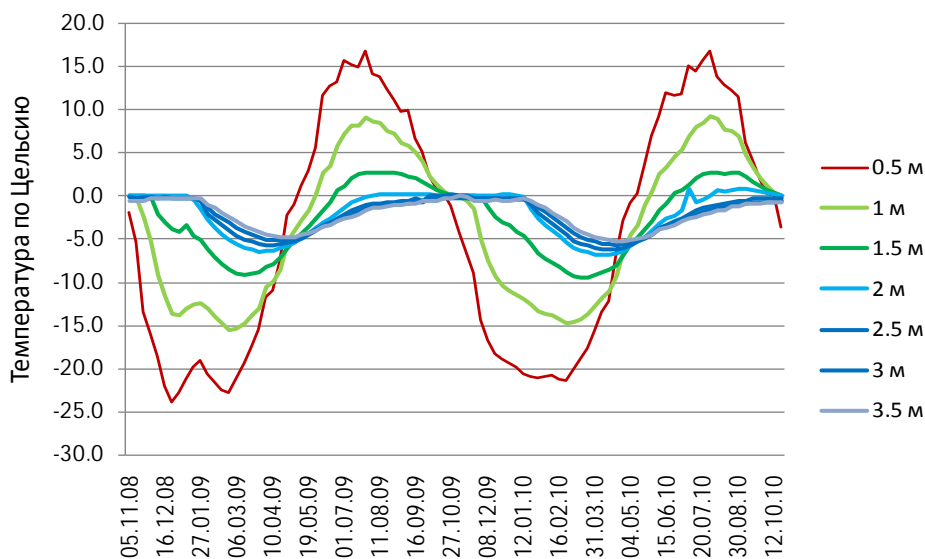


Рисунок 2. Результаты измерения температуры песчаных грунтов на различных глубинах.

Результаты радиоимпедансных зондирований в том же пункте, в то же время представлены в виде временного ряда изменений геоэлектрического строения толщи (рис. 3).

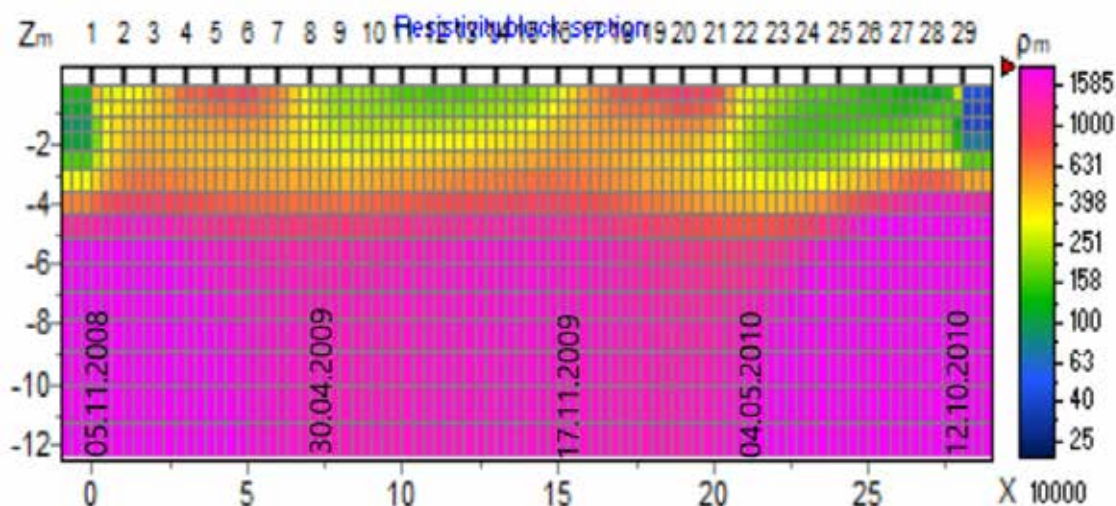


Рисунок 3. Временной ряд изменения геоэлектрического разреза на пункте в период с 5 ноября 2008 г. по 12 октября 2010 года на глубину до 12 м.

Временной ряд изменений геоэлектрического строения толщи (рис. 3) подтверждает справедливость исходной модели строения толщи мерзлых дисперсных грунтов. Представленный здесь красными тонами слой переходной промороженности в зимние периоды расширяется до дневной поверхности. К концу теплого периода 2010 г. наблюдается некоторое его сужение. По нашим предположениям, этот эффект вызван снижением теплопроводности более растепленных в этом году грунтов деятельного слоя.

Таким образом, промороженность грунтов, как и их растепленность, количественно изменяются год от года, под воздействием климатических факторов. Отсюда и появляется необходимость количественной оценки промороженности (растепленности) грунтов, выраженной в значениях их льдистости.

Для количественной оценки промороженности грунтов нами используется условный показатель льдистости (УПЛ), определяемый по результатам определения УЭС нестационарных слоев (Ефремов. 2022). Например, УПЛ слоя переходной промороженности в аномальное по растеплению лето 2007 года снижается в это год значительно, чем кажущееся сопротивление на частоте 171 кГц или УЭС слоя переходной промороженности (табл. 1). Значения УПЛ объективно отражают величину промороженности этого слоя.

Таблица 1

Дата	6.08. 2006	7.08.2007	5.08.2008
Кажущееся сопротивление на частоте 171 кГц	1550	1173	1378
УЭС слоя переходной промороженности на глубине 1,5–5 м, Ом·м	1773	1640	1667
Условный показатель льдистости слоя переходной промороженности	22,6	13,6	17,5

В заключение следует отметить важность практического значения количественной оценки промороженности грунтов по их льдистости. Подобная оценка позволит принять превентивные меры по устранению уменьшения льдистости при ее значениях, опасных для основания зданий и инженерных сооружений. Оценка условного показателя льдистости слоя переходной промороженности геофизическим методом с поверхности грунтов позволит оперативно предотвратить переход грунтов этого слоя в пластично-мерзлое состояние.

Литература

Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов. – Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2013. – 204 с.

Ефремов В.Н. Мониторинг сезонных изменений геоэлектрического разреза и электромагнитной эмиссии мерзлых грунтов // Материалы докладов EURASTRENCOLD-2022 X Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, 12–16 сентября 2022, г. Якутск. – С. 166–170.

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ГОРНЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЛЕТНИХ ТРЕНДОВ NDVI ПО ДАННЫМ LANDSAT

М.И. Захаров^{1,2*}, С. Гадаль^{1,2}, Ю.Г. Данилов¹, М.М. Черосов³

1 – Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

2 – Университет Экс-Марсель, CNRS, ESPACE, UMR 7300, Экс-ан-Прованс, Франция

3 – Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. М.Г. Софронова, ФГБУН ФИЦ ЯИЦ СО РАН, г. Якутск, Россия

** mi.zakharov@s-vfu.ru*

Аннотация. Мы проанализировали доступный архив данных программы Landsat с 1999 по 2021 гг. на участке исследования на переходе Орулганских гор в Янское плоскогорье, определенное долиной реки Бытантай и Омолой, и создали тренды биомассы с помощью нормализованного вегетационного индекса (NDVI) на облачной платформе Google Earth Engine (GEE). Используя ландшафтную карту участка исследования, полученные наборы трендов были разделены по 23 типологическим комплексам на уровне типов урочищ. Наши результаты показали, что: максимальное увеличение по трендам наблюдается для горных тундр с лишайниками и горных редколесий, расположенных на делювиальных и колювиальных горных склонах. Почти нулевой и один отрицательный тренд характерен для каменистых пустынь и интразональных долинных ландшафтов низкой террасы р. Бытантай. Для долинных болот и заболоченных лугов этот факт, скорее всего, связан с сильной амплитудой колебаний NDVI в зависимости от пожаров, антропогенных воздействий и периодов сильной обводненности заболоченных долинных лугов. Таким образом, можно констатировать изменения растительного покрова в сторону увеличения биомассы за счет «озеленения» тундры, кустарничков и разнотравий в редколесьях, которые также упоминаются в других работах по климатообусловленным динамикам горных ландшафтов.

Ключевые слова: горные мерзлотные ландшафты, динамика ландшафтов, NDVI, Landsat, анализ трендов.

STUDY OF MOUNTAIN PERMAFROST LANDSCAPES DYNAMICS IN NORTH-EASTERN SIBERIA USING LONG-TERM NDVI TRENDS BY LANDSAT DATA

M.I. Zakharov^{1,2*}, S. Gadal^{1,2}, Yu.G. Danilov¹, M.M. Cherosov³

1 – North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

2 – Aix-Marseille University, CNRS, ESPACE, UMR 7300, Aix-en-Provence, France

3 – Yakutsk Research Institute of Agriculture, FSBSI FRC YSC SB RAS, Yakutsk, Russia

** mi.zakharov@s-vfu.ru*

Abstract. We analyzed the available Landsat data archive from 1999 to 2021 in the study area at the transition of the Orulgan mountains to the Yana Plateau, defined by the Bytantai and Omoloi river valley and produced the biomass

trends using the Normalized Vegetation Index (NDVI) on the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. Using the landscape map of the study area, the resulting trend sets were divided into 23 typological landscape units. Our results showed that: the maximum trend increases were observed for mountain tundra with lichens and mountain sparse forests located on dealluvial mountain slopes and moraine mudslopes. Nearly zero and one negative trend is characteristic for rocky deserts and intrazonal valley landscapes of low terrace of the Bytantai River. For valley marshes and bog meadows this fact is most likely related to a strong amplitude of NDVI variation depending on wildfires, anthropogenic influences and periods of intense moisture in boggy valley meadows. Thus, we can state changes in vegetation cover towards an increase in biomass, due to "greening" of tundra and shrubs and mixed grasses in sparse forests, which are also mentioned in other works on climate-driven dynamics of mountain landscapes.

Keywords: mountain permafrost landscapes, landscape dynamics, NDVI, Landsat, trend analysis.

Сценарии изменения климата для типов растительности по Циркумполярной карте арктической растительности (CAVM) по (Pearson *et al.*, 2013) предполагают, что к 2050 г. не менее половины площадей всех классов перейдут в другой физиогномический класс, а деревопокрытие увеличится почти на 52 %. Ожидаемое распространение кустарников и деревьев ограничивается нехваткой земли в более высоких широтах и горах, что приводит к сокращению площади, покрытой некоторыми классами растительности, прежде всего, тундры. Известно, что дистанционное зондирование является подходящей методологией для обнаружения и мониторинга локальных и региональных ландшафтных динамических и эволюционных процессов (Gogineni, *et al.*, 2014; Jorgenson & Grosse, 2016). Дистанционное зондирование помогает анализировать динамические процессы в мерзлотных ландшафтах на больших площадях с помощью наборов данных в различных спектральных диапазонах и охватывающих несколько десятилетий.

Учитывая важность растительности в изучении динамики горных мерзлотных ландшафтов, мы выявляем изменения растительного покрова участка исследования на переходе Орулганских гор в Янское плоскогорье, определенное долинами рек Бытантай и Омолой. Для этого мы приняли подход линейных трендов NDVI временных рядов данных Landsat в каталоге облачной платформы Google Earth Engine, поскольку он поддерживает анализ больших объемов данных. Мы использовали весь архив данных датчиков TM, ETM+ и OLI, доступных для исследуемого участка в период с 1999 по 2021 гг., отфильтрованных по пиковым летним месяцам июля и августа и облачности менее 50 %. Чтобы сохранить единообразие данных для всех участков, мы решили не включать и не анализировать изображения до 1999 г. Для северо-востока Сибири до 1999 г. частота сбора данных была очень низкой. Мы выполнили процедуру гармонизации при создании длинных временных рядов, чтобы избежать потенциально значительных различий между спектральными характеристиками Landsat ETM+ и OLI согласно (Roy, *et al.*, 2016). Поскольку наша цель состоит в том, чтобы определить особенности динамики биомассы по типам ландшафта, на платформе GEE был составлен код для определения тренда с помощью линейной регрессии на основе медианных значений NDVI. На рисунке 1 показаны результирующие значения тренда по 23 типологическим единицам ландшафтов.

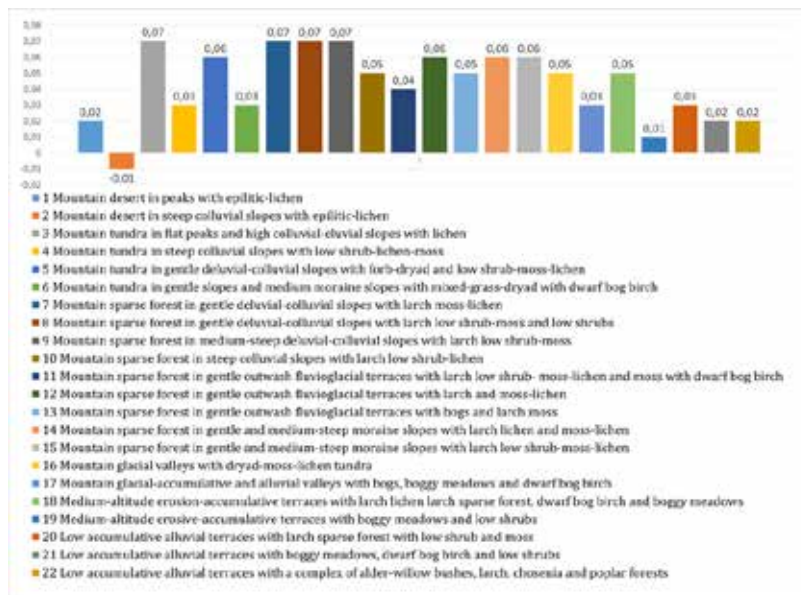


Рисунок 1. Тренды линейного медианного значения NDVI по типологическим единицам ландшафтов.

Максимальное увеличение по трендам наблюдается для горных тундр с лишайниками и для горных редколесий, расположенных на делювиальных и колювиальных горных склонах. Почти нулевой и один отрицательный тренд характерны для горно-пустынных и интразональных долинных северотаежных ландшафтов низкой террасы р. Бытантай. Для долинных болот и заболоченных лугов этот факт, скорее всего, связан с сильной амплитудой колебаний NDVI в зависимости от пожаров, сенокосов и периодов заболачивания. Этот факт можно проследить на графике прогресса NDVI.

Таким образом, можно констатировать изменения растительного покрова в сторону увеличения биомассы, скорее всего, за счет кустарников и разнотравий, которые также упоминаются в работе (Bernier et al., 2020). В тундровых ландшафтах наблюдается процесс «озеленения» наименее продуктивной части горных вершин средней высоты и на крутых склонах. Горная эпилитно-лишайниковая пустыня остается наиболее устойчивым типом ландшафта, что может быть связано с низким базовым уровнем биопродуктивности, отсутствием почв как таковых и очень медленной скоростью развития на данном этапе. Полученные результаты изменений NDVI и наблюдаемых тенденций согласуются с другими исследованиями тенденций биомассы для тундры и арктических экосистем (Liu, Huang, & Sun, 2021; Epstein, и др., 2018).

Литература

- Захаров, М.И. Анализ ландшафтной структуры восточного склона хребта Орулган / М.И. Захаров, Ю.Г. Данилов, С. Гадаль [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 3. – С. 49–55.
- Liu, C.; Huang, H.; Sun, F. A Pixel-Based Vegetation Greenness Trend Analysis over the Russian Tundra with All Available Landsat Data from 1984 to 2018. Remote Sens. 2021, 13, 4933.

- Berner, L., Massey, R., Jantz, P., Forbes, B., Macias-Fauria, M., Myers-Smith, I., Goetz, S. (2020). Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome. *Nature Communications*, 11, 4621.
- Pearson, R., Phillips, S., Loranty, M., & al., e. (2013). Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. *Nature Clim Change* 3, 673–677.
- Roy, D. P., Kovalsky, V., Zhang, H. K., Vermote, E. F., Yan, L. K., & Egorov, A. (2016). Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote sensing of Environment*, 185, 57-70.
- Epstein, H., Bhatt, U., Reynolds, M., Walker, D., Forbes, B. C., Horstkotte, T., Dickerson, C. (2018). Tundra Greenness Arctic Report Card. .

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА АНМАНГЫНДИНСКОЙ НАЛЕДИ (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

А.А. Землянская^{1*}, В.В. Оленченко², О.М. Макарьева¹

1 – Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

2 – Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

** a.zemlyanskova@spbu.ru, anastasiazemlanskova@gmail.com*

Аннотация. На гигантской наледной поляне, сформировавшейся в долине р. Анмангында, площадью более 7 км² в 2021-2022 гг. проведены геофизические исследования с целью изучения ее мерзлотно-геологического строения. Для этого использовались: метод георадиолокационной съемки, электротомография, зондирование становлением поля в ближней зоне и бесконтактное измерение электрического поля с заземлением через емкостную связь. По результатам работ была получена информация о характеристиках наледи в 2021 г.: средняя и максимальная толщина наледи составила 1,35 м и 4,35 м, площадь и объем наледи 3,73 км² и 3,56 млн. м³ соответственно. Определена глубина сезонного мерзлого слоя (средняя 4,5 м, максимальная – 6 м) и выявлена ее связь с толщиной наледи. Установлены геоэлектрические признаки крупных глубоких таликов и границы неглубоких надмерзлотных таликов.

Ключевые слова: георадиолокационное зондирование; гигантская наледь; глубина сезонного промерзания; р. Анмангында; удельное электрическое сопротивление; криолитозона.

RESULTS OF GEOPHYSICAL RESEARCH AT THE ANMANGYND AUFEIS (MAGADAN REGION)

A.A. Zemlianskova^{1*}, V.V. Olenchenko², O.M. Makarieva¹

1 – St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

2 – Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

** a.zemlyanskova@spbu.ru, anastasiazemlanskova@gmail.com*

Abstract. Geophysical studies were carried out in goal to study the permafrost-hydrogeological conditions of the aufeis glade (area more than 7 km²) of the Anmangynda River Basin. For this purpose, the following methods were used: ground penetrating radar sounding, electrical resistivity tomography, transient electromagnetic method and contactless measurement of the electric field with grounding through capacitive coupling. The information was obtained on the characteristics of the aufeis in 2021: the average and maximum thickness of the ice was 1,35 m and 4,35 m, the area and volume of the aufeis was 3,73 km² and 3,56 million m³, respectively. The depth of the seasonal frozen layer was determined (average 4,5 m, maximum 6 m) and the correlation with the ice thickness was revealed. The geoelectric signs of large deep taliks and the boundaries of shallow suprapermafrost taliks have been established.

Keywords: ground penetrating radar sounding; giant aufeis; seasonal freeze depth; the Anmangynda river; electrical resistivity; cryosphere.

Наледи — это специфическая форма сезонного оледенения, которая образуется в долинах рек в результате послойного намораживания подземных вод. Наледи характерны для регионов с суровым типом климата. Развитие наледных процессов указывает на взаимосвязь между геокриологическими условиями и гидрогеологическим циклом. Они

хорошо идентифицируются на снимках дистанционного зондирования Земли и могут быть использованы для оценки геокриологических условий в региональном масштабе.

В Магаданской области с целью изучения строения наледной поляны впервые в 1967 г. были проведены электроразведочные работы методом вертикального электрического сопротивления, и с тех пор сведения не обновлялись. Зарубежные коллеги показали высокую эффективность применения геофизических методов при изучении наледей, среди них: методы георадиолокации, электротомографии с гальваническими и емкостными заземлениями, метод ядерного магнитного резонанса, тепловизионная съёмка (*Liu et al., 2021; Terry et al., 2020*). Каждый из методов имеет свое ограничение по глубине получения данных. С помощью них можно узнать толщину льда, глубину сезонного промерзания, определить мёрзлое или талое состояние горных пород, выделить кровлю таликов и многолетнемерзлых пород и др.

В 2021-2022 гг. в долине р. Анмангында с целью изучения мерзлотно-гидрогеологического строения наледной поляны были проведены комплексные геофизические исследования. Основными задачами были определение толщины льда, глубины сезонного промерзания пород, выявление таликов и границ многолетнемерзлых пород. Для решения задач в период максимального промерзания (март) и максимального оттаивания (сентябрь) применялись методы георадиолокации (ГРЛ), бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП), электротомографии (ЭТ) и зондирования становлением поля в ближней зоне (метод ЗСБ).

Анмангындинская наледь – это вид сезонного оледенения, которая ежегодно формируется в долине одноименной реки. В настоящее время (2000-2022 гг.) ее максимальные размеры составляют 5,4 км² по площади и 8,2 млн м³ в объеме, а толщина льда в отдельных точках может достигать 5 м. В исторический период времени (1962- 1991 гг.) наледь была больших размеров (*Землянская и др., 2023*). Геологическое строение представлено пермскими отложениями, породами верхнего триаса и мела. Для бассейна р. Анмангында характерно повсеместное распространение многолетней мерзлоты мощностью от 100 до 450 м, иногда прерывающейся в таликовых зонах (*Букаев, 1966*).

Площадная георадиолокационная съёмка (сеть из 29 поперечных и одному продольному профилям) с применением георадара ОКО-3 с антенным блоком центральной частоты 250 МГц, проведенная по всей площади наледной поляны (более 7 км²), позволила установить места потенциальной разгрузки подземных вод, определить толщину наледи (средняя 1,35 м) и глубину сезонного промерзания (средняя 4,5 м) по состоянию на апрель 2021 г. На радарограммах отчетливо идентифицируются источники образования ледяных бугров или бугров пучения.

По данным ГРЛ в пределах участков формирования наледи средняя глубина промерзания пород составляет 4,5 м. Минимальная глубина СМС отмечается в зонах активной фильтрации подземных вод. В некоторых частях наледной поляны обнаружен сливающийся тип мерзлоты. В результате анализа данных ГРЛ было получено уравнение регрессии для оценки глубины сезонного промерзания под наледями.

Уникальные данные получены в результате совместного использования метода георадиолокации и бесконтактного измерения электрического поля с заземлением через емкостную связь. Впервые по данным электрических зондирований получена объёмная геоэлектрическая модель льда, в которой выделена линза незамёрзшей воды. Ранее о таких результатах известно не было (Оленченко и др., 2023).

Метод ЗСБ (зондирование становлением поля в ближней зоне) не дал однозначных результатов из-за проблем с измерением переходных процессов в очень высокоомной среде. В тех точках, где удалось выполнить количественную интерпретацию кривых становления поля, установлено, что подошва многолетнемерзлых пород, залегает на глубине 170- 250 м. Кроме этого, удалось зарегистрировать резкую смену геоэлектрических комплексов с высокоомного на низкоомный на разрезе через наледную поляну в направлении к устью ручья Слопцовый, где по геологическим данным предполагается наличие сквозного талика, питающего наледь. (Потапов и др., 2022).

По электротомографии в осенний период выделены границы неглубоких надмерзлотных таликов и глубоких (до 30 м) подрусловых таликов с каналами фильтрации в русловом аллювии и зоне экзогенной трещиноватости коренных пород, над которыми в зимнее время формируются ледяные бугры в местах выхода напорных подземных вод.

Исследования проводятся при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект 75295776). Обработка геофизических данных выполнена при частичной поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований No FWZZ-2022-0024.

Литература

Букаев Н.А. Основные закономерности режима гигантских наледей в верховьях р. Колымы (на примере Анмангындинской наледи) // «Наледи Сибири». – М.: Наука, 1966. – № 4. – С. 9–21.

Землянкова А.А., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962–2021 гг.) // Лед и снег. – 2023 (в печати).

Оленченко В.В., Макарьева О.М., Землянкова А.А., Данилов К.П., Осташов А.А., Калганов А.С., Нестерова Н.В., Христофоров И.И. Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) // Геодинамика и тектонофизика – 2023. – Т. 14, № 3.

Потапов В.В., Оленченко В.В., Макарьева О.М. Геоэлектрическое строение разреза на Анмангындинской наледи (Магаданская область) по данным метода ЗСБ // Материалы XVIII международной научной конференции (г. Новосибирск, 18–20 мая 2022 г.) – ИНГТ СО РАН. – Новосибирск, 2022. – Т. 2. – С. 59–65.

Liu W., Fortier R., Molson J., Lemieux J-M. A conceptual model for talik dynamics and icing formation in a river floodplain in the continuous permafrost zone at Salluit, Nunavik (Quebec), Canada // *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 32 – 2021 – Pp. 1–16.

Terry N. et al. Seasonal subsurface thaw dynamics of an aufeis feature inferred from geophysical methods // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 125, no. 3 – 2020 – С. e2019JF005345.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА ПО ДАННЫМ МЕТОДА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Ю.Г. Иванов*

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова, ВНИМС, пос. Чернышевский, Россия

**e-mail kompas04@mail.ru*

Аннотация. Состояние грунтового массива в основаниях сооружений влияет на безопасную и безаварийную работу гидротехнических объектов. Контроль за этим состоянием – важнейшая задача обеспечения безаварийной работы предприятия. Методы неразрушающего контроля, в частности, геофизические, достаточно широко применяются для осуществления геокриологического мониторинга. В работе показаны результаты применения метода микросейсмического зондирования для оценки состояния грунта в криолитозоне с использованием микросейсмических сигналов от мощных техногенных источников.

Ключевые слова: микросейсмические сигналы, криолитозона, грунты, гидротехнические сооружения.

EVALUATION OF THE STATE OF THE GROUND MASSIF ACCORDING TO THE DATA OF THE METHOD OF MICROSEISMIC SOUNDING IN THE CRYOLITHOZONE

Y.G. Ivanov^{1*}

P. I. Melnikov Permafrost Institute, VNIIMS, Chernyshevsky village, Russia

** e-mail kompas04@mail.ru*

Abstract. The condition of the soil mass in the foundations of structures affects the safe and trouble-free operation of hydraulic facilities. Monitoring this condition is the most important task of ensuring the trouble-free operation of the enterprise. Non-destructive testing methods, in particular, geophysical ones, are widely used for geocryological monitoring. The paper shows the results of applying the microseismic sounding method to assess the state of soil in the permafrost zone using microseismic signals from powerful technogenic sources.

Keywords: microtremor, cryolithozone, soils, hydraulic structures.

На многих гидротехнических сооружениях Западной Якутии, построенных, в основном, в середине прошлого века, наблюдается развитие неблагоприятных инженерно-геокриологических процессов, существенно влияющих на безопасную эксплуатацию предприятий. Причины, вызывающие эти процессы, могут быть как природного, так и техногенного характера. Но, в любом случае, катализатором активизации этих преобразований являются физико-химические изменения, связанные с фазовыми переходами воды в грунтах. При этом пространственно-временные вариации физических полей обусловлены трансформацией свойств грунтов, в частности, грунтов оснований и береговых примыканий гидротехнических сооружений (*Великин, 2014*). Контроль за состоянием грунтовых массивов в контексте безаварийной работы предприятий – важнейшая задача, стоящая перед специализированными организациями, ответственными за проведение соответствующих исследований.

На сегодняшний момент применение сейсморазведочных методов, позволяющих оперативно и с приемлемой точностью проводить наблюдения за состоянием грунтов на

гидротехнических сооружениях, порой невозможно из-за наличия помех от работающих механизмов, техники, гидроагрегатов ГЭС. Вместе с тем, техногенный шум можно использовать в качестве зондирующего сигнала при оценке состояния грунтов. Экспериментальные исследования в этом направлении в пределах правобережного примыкания Вилюйской ГЭС–1,2 проводит ВНИМС ИМЗ СО РАН.

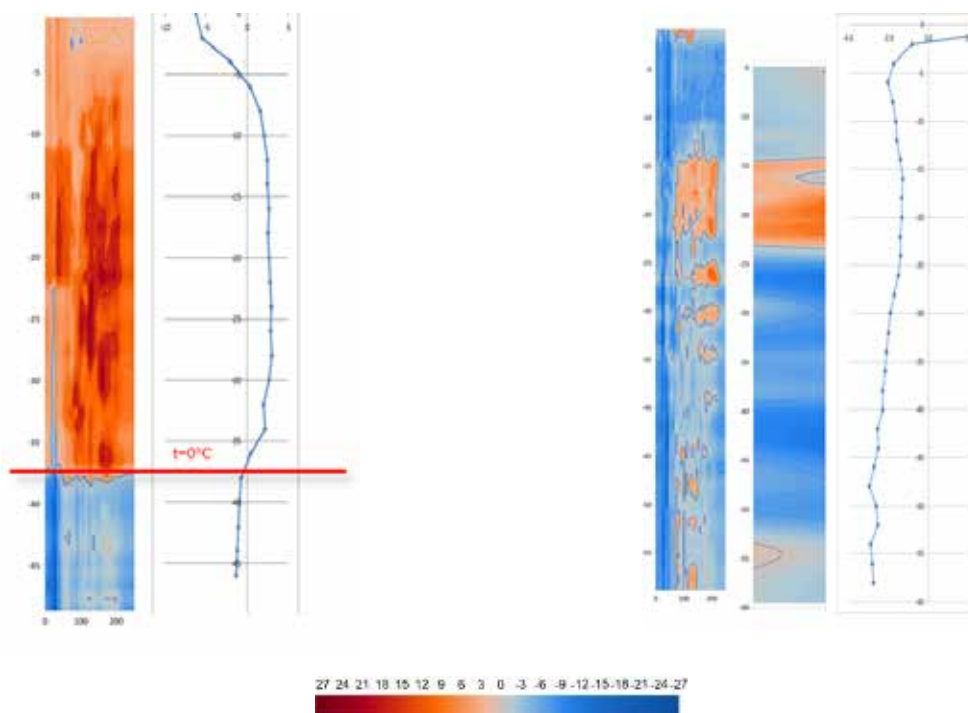


Рисунок 1. Скважинные наблюдения по стволам скважин NB-5 (слева) и NB-3(справа) на правобережном примыкании Вилюйской ГЭС–1,2. Шкала – в дБ.

В 2005 г. Горбатиковым А. В. был получен патент на новый способ сейсмической разведки, получивший название «Метод микросейсмического зондирования» (ММЗ) (Горбатилов, 2005). В основе метода лежит ряд закономерностей, полученных в ходе экспериментов, впоследствии получивших подтверждение на числовых моделях. Метод ММЗ применяется при поисках углеводородов, трубок взрыва, глубинных исследований земной коры и др. При этом частота наблюдаемого микросейсмического сигнала, определяющая глубину исследования (до нескольких десятков километров), составляет 0,03–15 Гц. То есть, сохранив технологию проведения полевых наблюдений и изменив регистрируемый частотный диапазон до 18–250 Гц, можно обеспечить исследования диапазона глубин в интервале 3–50 м.

На правобережном примыкании Вилюйской ГЭС–1,2 исследования методом ММЗ проводятся в поверхностном и скважинном вариантах. На рис. 1 представлены результаты проведения ММЗ в скважинах NB-6 и NB-3. Как видно на рисунке, уровень

микросейсмического сигнала в скважине NB-6 меньше 0 дБ в мерзлой части (ниже 38 м) и гораздо выше (до 25 дБ) в талой части (правый график). В правой части (рис. 1) показаны результаты исследований по скважине NB-3. Несмотря на отрицательную температуру по стволу скважины (правый график) в диапазоне глубин 12–25 м отмечается значительное увеличение амплитуд сигнала. Связано это с грунтами, более разуплотненными, чем в остальной части разреза. Вероятно, в этом диапазоне глубин и будет происходить развитие фильтрационных процессов, тем более что в соседней скважине, на удалении 40 м, именно в этом диапазоне глубин наблюдается максимальная температура по стволу скважины (около +3,5 °С). На среднем рисунке показаны результаты по небольшому профилю на дневной поверхности, пройденному в непосредственной близости от устья скважины. Результаты хорошо согласуются со скважинными данными.

Поверхностные наблюдения на одном из профилей представлены на рис. 2. Сверху на изображение наложена карта температур по этому же профилю. Как можно увидеть, в центральной его части наблюдается высокоамплитудная зона, весьма хорошо коррелируемая со значениями температуры по скважинам.

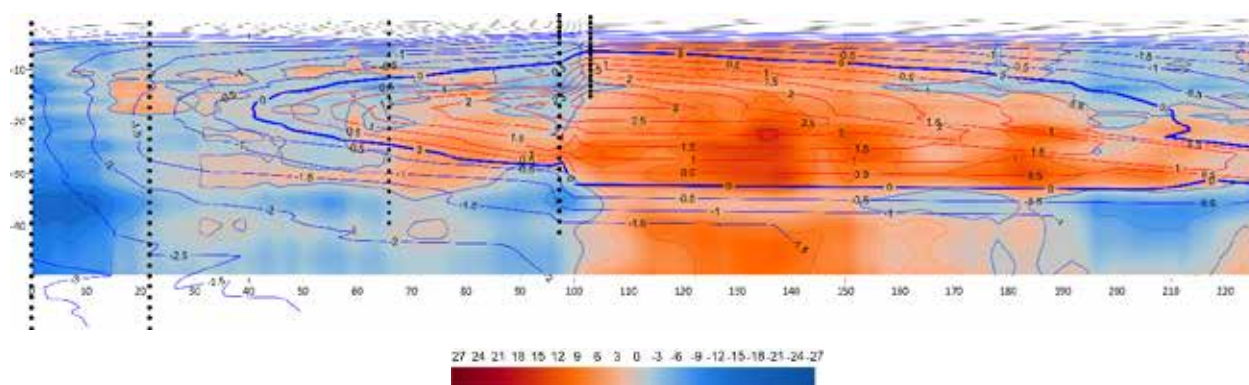


Рисунок 2. Наблюдения на дневной поверхности. Шкала – в дБ.

Таким образом, можно констатировать, что метод микросейсмического зондирования вполне применим при определенных условиях для диагностирования состояния грунтового массива, мониторинга изменения упругих свойств грунтов, прогноза развития неблагоприятных геокриологических процессов. Кроме того, метод обладает достаточно малой трудоемкостью при проведении полевых работ, при этом используется обычная инженерная сейсмостанция и серийно выпускаемые сейсмоприемники.

Литература

Великин, С. А. Особенности геофизического мониторинга гидротехнических сооружений в криолитозоне / С. А. Великин // Наука и образование. – № 4. – 2012. – С. 29–34.

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПО ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

Р.Н. Иванова*

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

**r.n.ivanova@mail.ru*

Аннотация. Приводится ландшафтно-климатическое районирование территории Восточной Сибири по изменению таких климатических переменных, как распределение коэффициента линейного тренда минимальных температур воздуха, индексов промерзания и протаивания, относительной суровости климата, которые можно применить для оценки динамики локальных процессов деградации многолетней мерзлоты.

Ключевые слова: минимальная температура воздуха, индекс протаивания, индекс промерзания, индекс относительной суровости климата.

ZONING THE TERRITORY OF EASTERN SIBERIA ACCORDING TO CHANGES IN CLIMATIC VARIABLES

R.N. Ivanova*

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

**r.n.ivanova@mail.ru*

Abstract. The landscape-climatic zoning of the territory of Eastern Siberia according to changes in such climatic variables as the distribution of the linear trend coefficient of minimum air temperatures, freezing and thawing indices, relative climate severity index, which can be applied to assess the dynamics of local processes of permafrost degradation, is given.

Keywords: minimum air temperature, thawing index, freezing index, relative climate severity index.

Климатические переменные используются многими исследователями для оценки пространственного изменения важных факторов среды обитания. Как известно, прямой связи и четкой обусловленности между средними годовыми температурами воздуха и многолетнемёрзлых горных пород нет. Тем не менее, эта характеристика даёт возможность оценить термический режим малоизученных территорий и составить карты их пространственного распределения. Например, средние годовые температуры воздуха ниже -8°C характерны для территорий, на 90–100 % занятых сплошным распространением многолетней мерзлоты, или средние годовые температуры воздуха от $-1,5$ до -3°C соответствуют при островной мерзлоте с площадным распространением мёрзлых пород в 30–50 % и т.д. (Гаврилова, 1981).

Об изменении климатических условий говорит и распределение минимальных температур. Наиболее подробную картину современных тенденций изменения минимальных температур воздуха дают географические распределения коэффициентов линейного тренда на территории северо-востока Евразии за 1961–2020 гг., в целом для года и наиболее холодного месяца – январь (табл. 1). Можно заметить, что потепление происходило по всей территории. Наибольшие значения повышения отмечаются в зоне среднетаёжных ландшафтов на сплошной мерзлоте, за ними следуют северотаёжные ландшафты леного

сектора. Заметно повысились минимальные температуры среднетаёжных ландшафтов на прерывистой мерзлоте и горной тайге на Дальнем Востоке. Также отмечается ослабление абсолютных минимумов температуры в признанных полюсах холода – Верхоянске и Оймяконе.

Таблица 1

Характеристики изменения минимальной температуры воздуха за 1961–2020 гг.

Метеостанция	Абсолютн. минимум, °С	Средняя из абсолют-х минимумов января, °С	Тренд изменения минимумов января, °С/год	Метеостанция	Абсолютн. минимум, °С	Средняя из абсолют-х минимумов января, °С	Тренд изменения минимумов января, °С/год
Тундра							
Северо-Восток Якутии				Ленский сектор			
Котельный	–49,9	–32,8	+0,04	Саскылах	–60,3	–38,3	+0,03
Амбарчик	–49,5	–32,7	+0,05	Тикси	–50,5	–34,3	+0,05
Чокурдах	–54,4	–37,3	+0,05	–	–	–	–
Северная тайга							
Северо-Восток Якутии				Ленский сектор			
Среднеко-лымск	–56,1	–39,2	+0,05	Кюсюр	–61,6	–41,4	+0,04
Зырянка	–55,6	–39,5	+0,05	Шелагонцы	–64,8	–45,4	+0,09
Верхоянск	–63,0	–48,8	+0,07	Оленек	–60,0	–41,0	+0,09
Оймякон	–65,4	–50,0	+0,06	Жиганск	–59,6	–41,1	+0,08
Средняя тайга							
На сплошной мерзлоте				На прерывистой мерзлоте			
Виллойск	–58,7	–39,8	+0,10	Алдан	–48,6	–30,7	+0,03
Якутск	–59,3	–42,2	+0,10	Олекминск	–56,9	–34,9	+0,06
Иситель	–54,9	–38,0	+0,10	Ленск	–56,3	–32,8	+0,05
Усть-Мая	–58,9	–43,5	+0,10	Витим	–60,2	–33,4	+0,08
Горная тайга							
Средняя Сибирь				Дальний Восток			
Багдарин	–51,6	–34,9	+0,02	Бомнак	–51,1	–34,7	+0,09
Нижнеан-гарск	–41,9	–25,1	+0,05	Экимчан	–49,7	–35,4	+0,05

Абсолютные минимумы температуры воздуха случались не только в январе, но и в феврале (Котельный, Тикси, Саскылах, Багдарин, Нижнеангарск) и в декабре (Кюсюр, Иситель, Шелагонцы, Экимчан). Пик минимальных значений за период 1960–2020 гг. приходится на десятилетие 1970-х. В зоне влияния моря Лаптевых минимумы температуры воздуха случались в 2000-е, Восточно-Сибирского моря – в 1960-е.

Ранее нами были оценены отклонения средних годовых температур воздуха, индексов протаивания и промерзания для 49 метеорологических станций по фазам потепления 1935–1945, 1988–1995, 2005–2009 гг. (Fedorov et al., 2014). Продолжая эту работу, можно заметить усиление интенсивности потепления за последнее десятилетие, особенно ярко выражающееся в ослаблении индекса промерзания.

Для оценки динамики границ площадного распространения мерзлоты может быть интересно применение индекса относительной суровости (далее *Иос*) – отношение величины температуры воздуха самого холодного месяца к величине самого тёплого (Нечаев, 1981).

Используя данный индекс, мы провели анализ изменения его в разных временных интервалах с 1931 по 2020 гг. (рис. 1). В целом *Иос* в Восточной Сибири за период 1931–2020 гг. в большинстве ландшафтно-климатических зон остаётся в стабильном состоянии. Но значение *Иос* –3 и ниже (с преимущественным распространением сплошной мерзлоты, с температурой грунта ниже –3°) за последнее 30-летие повысилось в районе Хатанги и Среднеколымска, а значение *Иос* –2 (с преимущественным распространением островной и прерывистой мерзлоты, с температурами грунта от 0 до –3°) более обширно: в районах юго-западной Якутии (Витим), Забайкалья (Баргузин, Усть-Баргузин, Нижнеангарск) и Дальнего Востока (Имени Полины Осипенко, Норск, Охотск).

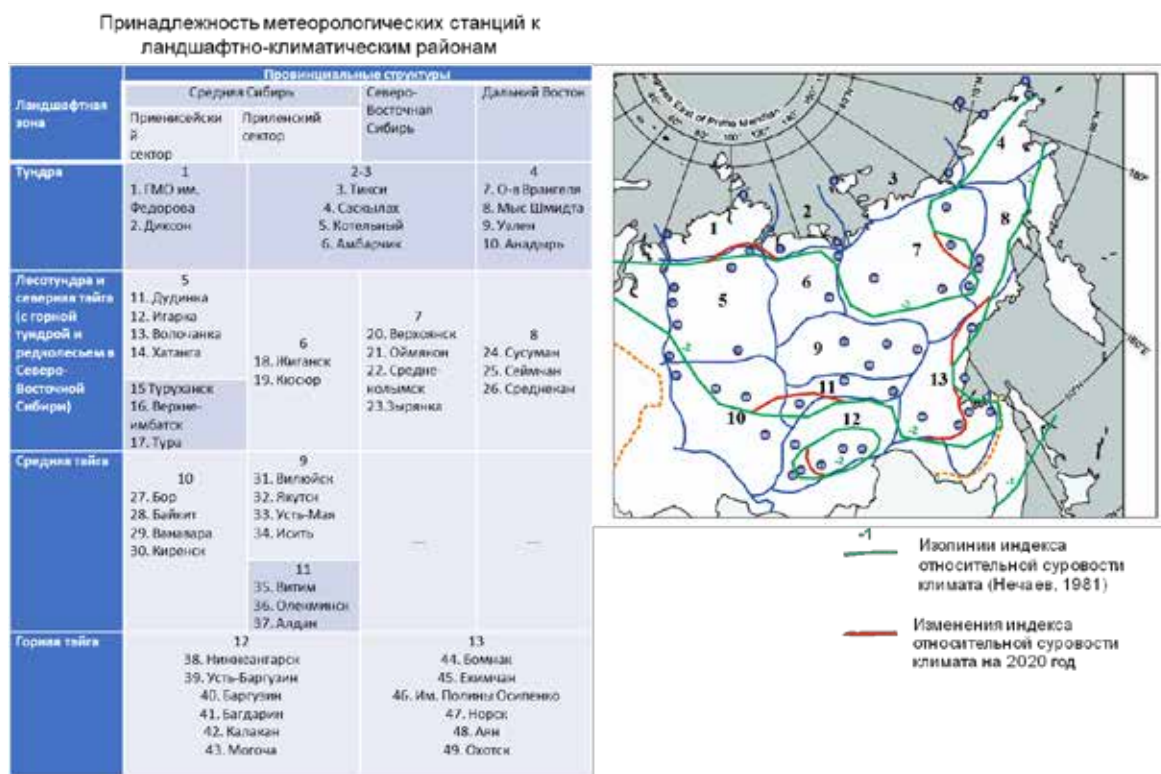


Рисунок 1. Картограмма динамики изолиний индекса относительной суровости Восточной Сибири.

Повышение значения *Иос* – 2 может указать на локальные процессы деградации многолетней мерзлоты, которые могут быть связаны с относительно небольшими по амплитуде и продолжительности колебаниями климатических условий. А увеличение *Иос* – 3 – на смещение границы характера распространения мерзлоты, связанное со значительными изменениями климата.

Литература

Гаврилова М.К. Современный климат и вечная мерзлота на континентах. – Новосибирск: Наука, 1981. – 113 с.

Нечаев В.П. О некоторых соотношениях между мерзлотными и климатическими параметрами и их палеогеографическое значение // Вопросы палеогеографического плейстоцена ледниковых и перигляциальных областей / Под ред. А.А. Величко, В.П. Гричука. – М.:1981. – С. 211–220.

Fedorov A.N., Ivanova R.N., Park H., Hiyama T., Iijima, Y. Recent air temperature changes in the permafrost landscapes of northeastern Eurasia // Polar Science. – 2014, no. 8(2). – Pp. 114-128.

ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ МЕТАНА И ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПОДМЕРЗЛОТНЫХ ГОРИЗОНТАХ С ГИДРОКАРБОНАТНО-НАТРИЕВЫМ ТИПОМ ВОД

Л.П. Калачева¹, И.К. Иванова¹, А.С. Портнягин¹, М.Е. Семенов^{1,2}, В.К. Иванов^{1*},
К.К. Аргунова¹

1 – Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

2 – Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

**viktorklimentievich@gmail.com*

Аннотация. В работе приведены результаты определения границ зоны стабильности гидратов на перспективных площадях Вилуйской синеклизы, подходящих для создания подземных хранилищ газа. Равновесные условия образования гидратов метана и природного газа в растворах гидрокарбоната натрия с концентрациями 2,5 и 20 г/л изучены методом дифференциального термического анализа. Установлено, что верхние границы зоны стабильности гидратов метана и природного газа располагаются в толще многолетнемерзлых пород, а расположение нижних границ зависит от концентрации растворов гидрокарбоната натрия. Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод, что в подмерзлотных водоносных горизонтах Вилуйской синеклизы существуют благоприятные условия для образования гидратов метана и природного газа.

Ключевые слова: гидраты природного газа, водоносные горизонты, подземное хранилище газа, зона стабильности гидратов, геотермический градиент, равновесные условия гидратообразования.

STABILITY ZONES OF METHANE AND NATURAL GAS HYDRATES IN SUBPERMAFROST HORIZONS WITH SODIUM BICARBONATE WATER TYPE

L.P. Kalacheva¹, I.K. Ivanova¹, A.S. Portnyagin¹, M.E. Semenov^{1,2}, V.K. Ivanov^{1*},
K.K. Argunova¹

1 – Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk, Russia

2 – Kazan federal university, Kazan, Russia

**viktorklimentievich@gmail.com*

Abstract. The paper presents the results of the boundaries determination of the hydrate stability zone in the promising areas of the Vilyui syncline, suitable for creating of underground gas storage facilities. The equilibrium conditions of methane and natural gas hydrates formation in sodium bicarbonate solutions with concentrations of 2.5 and 20 g/l were studied by differential thermal analysis. It has been established that the upper boundaries of the methane and natural gas hydrate stability zone are located in the permafrost, and the location of the lower boundaries depends on the concentration of sodium bicarbonate solutions. The obtained experimental results allow us to conclude that in the subpermafrost aquifers of the Vilyui syncline, there are favorable conditions for methane and natural gas hydrates formation.

Keywords: natural gas hydrates, aquifers, underground gas storage, hydrate stability zone, geothermal gradient, equilibrium conditions for hydrate formation.

Введение. Для бесперебойного снабжения потребителей газом в зимний период и в случае аварийных ситуаций, на магистральных газопроводах вблизи крупных газопотребляющих центров сооружаются подземные хранилища газа. Они создаются либо в

пористых породах (истощённых месторождениях углеводородов, водонасыщенных пористых пластах), либо в полостях горных пород (в горных выработках подземных рудников и шахт, соляных отложениях), расположенных на глубинах от 300 м до 1 км. На территории Республики Саха (Якутия) из-за практически повсеместного распространения многолетнемерзлых пород имеются термодинамические предпосылки для хранения газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах. Преимущества такого хранения газа заключаются в компактности, поскольку закачиваются большие объемы газа по сравнению с обычными хранилищами, и стабильности, так как закачиваемый газ при определенных соотношениях температуры и давления превращается в твердый гидрат, связывая свободную пластовую воду. В качестве непроницаемой крышки служат многолетнемерзлые породы, которые обеспечивают герметичность резервуара.

Подземные воды Вилюйской синеклизы преимущественно представлены двумя типами (по В.А. Сулину): гидрокарбонатно-натриевым и хлоридно-кальциевым. Состав вод изменяется сверху вниз по разрезу от гидрокарбонатного натриевого до хлоридно-натриевого и хлоридно-кальциево-натриевого. Минерализация гидрокарбонатно-натриевого типа вод изменяется от 1 до 20 г/л (*Железняк, Семенов, 2020*).

Для создания хранилищ газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах Вилюйской синеклизы выбраны площади: 1 – 23 км Вилюйского тракта; 22 – Намская; 28 – пос. Магарас; 41 – Уордахская. На площади 1 глубина залегания нижней границы многолетнемерзлой толщи составляет от 300 до 400 м, а на 28, 41 и 22 – от 400 до 500 м (*Железняк, Семенов, 2020*).

В качестве газов-гидратообразователей были использованы метан (99,99 % мол.) и природный газ Средневилюйского ГКМ, состав которого (% мол.): метан – 93,9; этан – 4,44; пропан – 1,10; изобутан – 0,087; н-бутан – 0,108; диоксид углерода – 0,056; азот – 0,33. Молярная масса газа – 17,11 г/моль; относительная плотность – 0,592. Объектами исследования являлись гидраты этих газов, полученные в объеме растворов гидрокарбоната натрия с концентрациями 2,5 и 20 г/л, которые по степени минерализации относятся к солоноватым и соленым водам, соответственно (*Воды..., 1989*). Термобарические условия образования гидратов метана и природного газа изучали методом дифференциального термического анализа. Полученные равновесные кривые были сопоставлены с расчетными (*Sloan, Koh, 2008*) для систем «метан – вода» и «природный газ – вода».

Результаты и их обсуждение. Для оценки возможности образования гидратов в подмерзлотных водоносных горизонтах были использованы значения геотермических градиентов рассматриваемых площадей (*Железняк, Семенов, 2020*) и экспериментально

полученные равновесные кривые гидратообразования метана и природного газа в объеме растворов гидрокарбоната натрия. Результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1

Нижние границы ЗСГ метана и природного газа на площадях Вилюйской синеклизы

Нижняя граница ЗСГ, м			Площадь			
			1	22	28	41
Природного газа	раствор NaHCO ₃	2,5 г/л	1440	1220	1280	1360
		20 г/л	1430	1200	1250	1350
Метана		2,5 г/л	1180	1080	970	1130
		20 г/л	1120	1050	920	1090

Установлено, что верхние границы зоны стабильности гидратов (ЗСГ) на площадях располагаются в толще многолетнемерзлых пород. Расположение нижних границ ЗСГ на площадях зависит от величины геотермического градиента и концентрации раствора гидрокарбоната натрия (таблица). В соленой воде равновесные кривые гидратообразования метана и природного газа смещены в область низких температур, а в солоноватой практически совпадают с расчетными кривыми гидратообразования в чистой воде. В зависимости от мощности многолетнемерзлых толщ и геотермического градиента, нижние границы ЗСГ метана и природного газа в присутствии солоноватой воды изменяются от 970 до 1180 м и от 1220 до 1440 м, соответственно. При наличии соленой воды границы располагаются выше на 30–60 м для метана и на 10–30 м – для природного газа.

Заключение. Расположение нижних границ ЗСГ влияют на глубину и объем подземного хранилища газа. Так как температуры на поверхности и в разрезе пород непостоянны во времени, границы ЗСГ могут перемещаться по вертикали. С понижением температуры окружающей среды нижняя граница ЗСГ перемещается вниз, а при потеплении климата – вверх. В связи с этим, при проектировании хранилища необходимо учитывать следующее: 1) поскольку образование гидратов протекает с выделением теплоты, которая может привести к уменьшению мощности криолитозоны, кровля должна располагаться ниже нулевой изотермы; 2) подошва хранилища не должна достигать нижней границы ЗСГ, так как ее положение не постоянно. Однако для окончательных выводов о возможности создания подземных хранилищ газа в гидратном состоянии необходимо уточнить следующие параметры по рассматриваемым площадям: мощность многолетнемерзлых толщ, состав пород и их фильтрационно-емкостные свойства.

Работа выполнена в рамках Госзадания №АААА-А21-121011490056-4 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН и гранта №13.ЦКП.21.0016.

Литература

Воды нефтяных и газовых месторождений СССР: справочник / под ред. Л.М. Зорькина. – Москва: Недра, 1989. – 383 с.

Железняк М.Н., Семенов В.П. Геотемпературное поле и криолитозона Вилуйской синеклизы. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2020. – 123 с.

Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases. – Boca Raton: Taylor&Francis Group/CRC Press, 2008. – 720 p.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КРИОЛИТОЗОНЫ В ИГМ СО РАН

А. А. Картозия^{1,2*}, И. Д. Зольников¹, Н. Н. Добрецов¹

1 – Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

2 – Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия

**andrei.kartozia@igm.nsc.ru*

Аннотация. Из-за труднодоступности северных территорий и необходимости мониторинга состояния земной поверхности, особенно значимыми становятся методы ГИС-анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ). На протяжении последних двух десятилетий коллектив лаборатории Геоинформационных технологий и дистанционного зондирования Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН активно применяет методы ГИС-анализа данных дистанционного зондирования (ДДЗ) для изучения закономерностей геолого-геоморфологического и геокриологического строения территорий в области распространения многолетнемерзлых пород. В частности, проводился ГИС-анализ ДДЗ с БПЛА, а также анализ вертикальных смещений поверхности объектов инфраструктуры и природных ландшафтов методами дифференциальной радарной интерферометрии (SAR). Проведенные работы позволили получить фактический материал об изменениях природной среды в области распространения криолитозоны и расширить инструментарий доступных методов коллектива лаборатории.

Ключевые слова: ГИС-анализ, дистанционное зондирование, криолитозона, ИГМ СО РАН.

THE GEOINFORMATION TECHNOLOGIES USING IN PERMAFROST STUDIES AT IGM SB RAS

A. A. Kartozia^{1*}, I. D. Zolnikov¹, N. N. Dobretsov¹

1 – V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

2 – A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

**andrei.kartozia@igm.nsc.ru*

Abstract. The methods of GIS-analysis of remote sensing data become especially significant today due to the inaccessibility of the northern territories. Over the past two decades, the staff of the laboratory “Geoinformation technologies and remote sensing” of the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS actively applies the GIS-analysis of remote sensing data for studying of permafrost. In particular, we carried out a GIS-analysis of remote sensing data from UAVs, as well as an analysis of vertical displacements of infrastructure objects surfaces using SAR methods. These studies made it possible to obtain factual material on changes in the natural environment in the distribution area of the permafrost and to expand the tools available for methods of the laboratory staff.

Keywords: GIS-analysis, remote sensing, permafrost, IGM SB RAS.

Множество современных исследований подтверждает наличие тренда повышения средней температуры поверхности Земли. Отмечается, что в полярных широтах Северного

полушария температура земной поверхности растет быстрее (*Blackport, Screen, 2020*). Глобальные изменения климата привели к заметному повышению интенсивности таяния подземных льдов, из-за чего активизировались связанные с ним опасные геологические процессы. Они угрожают как объектам инфраструктуры, так и проживающему в области распространения криолитозоны населению. Из-за труднодоступности северных территорий и необходимости мониторинга состояния земной поверхности, особенно значимыми становятся методы ГИС-анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ). В первую очередь, эти данные включают в себя цифровые модели рельефа и многоканальные спутниковые снимки. С помощью ГИС-анализа ДДЗ можно выявлять динамику и определять тренды трансформации геолого-геоморфологического каркаса природной среды, прогнозировать будущие изменения рельефа и их последствия. В свою очередь, подобные прогнозы позволяют минимизировать ущерб, который могут нанести процессы, связанные с деградацией подземных льдов.

На протяжении последних двух десятилетий коллектив лаборатории Геоинформационных технологий и дистанционного зондирования Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН активно применяет методы ГИС-анализа данных дистанционного зондирования (ДДЗ) для изучения закономерностей геолого-геоморфологического и геокриологического строения территорий в области распространения многолетнемерзлых пород. Исследования проводились по разным предметным областям.

1. Разработка методики детального картографирования полигонального рельефа с целью районирования территории по степени деградации повторно-жильных льдов на основе ГИС-анализа данных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (*Kartozia, 2019*). Применение данной методики позволило построить детальную геоморфологическую карту криогенного рельефа и карту состояния полигонального рельефа острова Самойловский (дельта р. Лены). Кроме того, данная методика легла в основу алгоритма почвенно-геоморфологического картографирования с помощью ГИС-анализа данных с БПЛА, которая была апробирована на том же острове (*Polyakov et al., 2022*). Использование детальных ДДЗ с БПЛА помогло при прогнозе будущего развития ландшафтов на основе анализа растительных сукцессий в рамках геоботанических исследований. Описание разработанных методик и полученные результаты приведены в ряде опубликованных работ.

2. Анализ вертикальных смещений поверхности объектов инфраструктуры и природных ландшафтов методами дифференциальной радарной интерферометрии (SAR). Данная технология позволяет с миллиметровой точностью оценивать вертикальные смещения земной поверхности в мм/год (точность $\pm 2-5$ мм, обусловлена длиной радиоволн). В рамках исследований по данному направлению была изучена территория

г. Норильска и его окрестностей. Анализ временного ряда, содержащего 69 интервалов измерений за 2,5 года (с января 2019 по июнь 2021 гг.) позволил оценить вертикальные смещения поверхностей, в том числе динамику вертикальных смещений отдельных техногенных объектов, а также выявить пространственное распределение скоростей вертикального смещения на территории г. Норильска.

Проведение вышеперечисленных исследований позволило накопить обширный фактический материал об изменениях природной среды в области распространения криолитозоны. Полученные результаты и выявленные закономерности опубликованы в ряде статей в высококвартильных журналах, что подтверждает актуальность исследований и высокий уровень их научной значимости. Ряд исследований проводился в рамках хозяйственных договоров подряда с различными организациями. Полученные результаты полностью удовлетворили заказчиков работ. Кроме того, проведенные работы позволили значительно расширить инструментарий доступных методов коллектива лаборатории.

Литература

Blackport, R., Screen, J. A. Weakened evidence for mid-latitude impacts of Arctic warming // Nat. Clim. Chang. Vol. 10 – 2020 – Pp. 1065-1066. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00954-y>

Kartozia, A. Assessment of the Ice Wedge Polygon Current State by Means of UAV Imagery Analysis (Samoylov Island, the Lena Delta) // Remote Sensing. Vol. 11, no. 13 – 2019 – 1627. <https://doi.org/10.3390/rs11131627>

Polyakov, V., Kartozia, A., Nizamutdinov, T., Wang, W., Abakumov, E. Soil-geomorphological mapping of Samoylov Island based on UAV imaging // Frontiers in Environmental Science. – Vol. 10 – 2022. – 948367. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.948367>

ПОПУЛЯРИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМ МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА

Д. И. Коровина*

Экспертный центр «ПОРА», Москва, Россия

**korovina@porarctic.ru*

Аннотация. Вечная мерзлота в Российской Федерации распространяется на 11 млн км² и составляет около 65 % территории страны. Наблюдаемые изменения климата заставляют бить тревогу во всех сферах деятельности, которые завязаны на климатических условиях. Согласно последним оценочным докладам, темпы повышения арктических температур приземного воздуха наиболее высокие; так, за период с 1991 по 2020 гг. линейный рост температуры в Северной полярной области составил около 2,64 °С [1], что негативно сказывается на промышленности и жилищных условиях в криолитозоне. Такие изменения требуют большего информирования населения о данной проблеме, в связи с чем был создан специализированный информационный ресурс «Невечная мерзлота». На сайте geokrio.ru содержится подробная информация об опасных природных процессах в области вечной мерзлоты, в создании публикаций участвуют ведущие российские эксперты-мерзлотоведы.

Ключевые слова: вечная мерзлота, информационный ресурс, изменение климата, мониторинг.

POPULARIZATION OF CRYOLITHOLOGY PROBLEMS WITH THE HELP OF A SPECIALIZED INFORMATION RESOURCE

D. I. Korovina*

Expert Center for Arctic Development (PORA), Moscow, Russia

**korovina@porarctic.ru*

Abstract. In the Russian Federation permafrost covers 11 million km² and makes up about 65% of the country's territory. Observed climate changes threaten all activities that are tied to climatic conditions. According to the latest assessment reports, the rate of increase in Arctic surface air temperatures is the highest since 1991 to 2020. Linear increase in temperature in the North Polar region was about 2.64°C (*Третий ...*, 2022), which negatively affects industry a housing conditions in the permafrost zone. Such changes require greater awareness of the population about this problem, thus a specialized information resource "Non-permafrost" was created. The site geokrio.ru contains detailed information about dangerous natural processes in the permafrost areas. Leading Russian permafrost experts participate in the creation of the publications.

Keywords: permafrost, information resource, climate change, monitoring.

Наблюдение за состоянием криолитозоны – значимый фактор обеспечения устойчивого развития Арктики. В Государственной думе в I чтении принят закон о создании системы мониторинга вечной мерзлоты на территории России. В связи с этим в начале марта 2023 г. на экологическом форуме «Чистая страна» Проектный офис развития Арктики организовал сессию «Невечная мерзлота», где представители Совета Федерации, крупнейших добывающих компаний, вузов и научных организаций обсудили важность закона о вечной мерзлоте, разработку системы мониторинга, необходимые поправки в будущем.

Важность организации мониторинга многолетнемёрзлых грунтов бесспорна. В настоящее время наблюдения за фоновым состоянием криолитозоны выполняются по международной программе в рамках Сети глобального мониторинга криолитозоны (GTN-P – Global terrestrial Network on Permafrost). Измерения мощности активного слоя ведутся в рамках Программы циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM – Circumpolar Active Layer Monitoring) (*Международная...*, 2023).

По оценке Яндексa, в марте 2023 года около 100 тыс. поисковых запросов в месяц связаны с фразами, в составе которых содержится слово «мерзлота». Основная доля запросов приходится на регионы, которые непосредственно находятся в криолитозоне, и Москву. Для многомиллионной страны – это достаточно низкий показатель заинтересованности, учитывая тот факт, что многие живущие непосредственно на вечномёрзлых грунтах не знают об этом явлении.

Исходя из ранее изложенной информации, и опираясь на то, что большая часть территории России находится в области вечномёрзлых грунтов, возникла необходимость создания единого информационного ресурса по данной тематике. Проект «Невечная мерзлота» (*Проект...*, 2023) основан Проектным офисом развития Арктики (ПОРА) в связи с острой необходимостью популяризации данной проблемы, с целью доступным языком

рассказать о том, что такое мерзлота, какие опасности в ней скрыты и как бороться с наблюдаемыми изменениями.

Сайт имеет ряд разделов, которые постоянно пополняются и редактируются. В разделе «О мерзлоте» широкая аудитория знакомится с основными понятиями в области изучения вечномёрзлых грунтов, здесь содержится образовательная база, подкрепляемая интерактивными картами и визуально привлекательной инфографикой.

Раздел «Мониторинг» пополняется информацией об авариях на объектах криолитозоны и соответствующих последствиях. Собранная информация отмечается на интерактивной карте.

Раздел «Аналитика и события» еженедельно пополняется информацией. Здесь собираются важнейшие новости, связанные с мерзлотой как на территории России, так и в других странах. Также публикуются научно-популярные статьи о мерзлоте, написанные экспертами специально для нашего ресурса.

В разделе «Опыт компаний» собирается информация о том, с какими проблемами сталкиваются компании при строительстве и эксплуатации объектов на многолетнемерзлых грунтах, а также какие решения принимаются для предупреждения негативных последствий.

Проект «Невечная мерзлота» активно развивается и приглашает новых авторов к сотрудничеству.

Проектный офис развития Арктики издаёт журнал «Арктика 2035», который также открыт для публикаций по данной тематике.

ПОРА приглашает исследователей реализовывать при поддержке своей грантовой системы новые проекты, создаваемые с целью совершенствования информационных ресурсов в области мерзловедения. Также идёт активное продвижение данной темы с помощью ресурсов ПОРА: в их число входят собственные сетевые ресурсы, площадки в ведущих социальных сетях и площадки партнёрских СМИ.

Литература

Международная программа мониторинга криолитозоны [Электронный ресурс] – URL: <https://gtnp.arcticportal.org/>. – Дата обращения : 06.04.2023.

Проект «Невечная мерзлота» [Электронный ресурс] – информационный ресурс [сайт] URL: — <https://porarctic.ru/ru/projects/geokrio/> – Дата обращения : 06.04.2023.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. — М. : Росгидромет. – 2022 – 124 с.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НАДМЕРЗЛОТНЫХ ТАЛИКОВ В СПЛОШНОЙ КРИОЛИТОЗОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Л.С. Лебедева*, И.И. Христофоров, К.П. Данилов, И.В. Горохов

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

* lyudmilaslebedeva@gmail.com

Аннотация. Целью работы являлась оценка распространения надмерзлотных субаэральных таликов в Центральной Якутии. Были выполнены геофизические съемки методом георадиолокации вдоль 90 профилей общей протяженностью более 21 км для обнаружения надмерзлотных таликов в Центральной Якутии вдоль автомобильных дорог «Лена» и «Алдан». На 25 профилях были обнаружены талики различной протяженностью и мощностью от 3 до 20 м. Все выявленные талики приурочены к хорошо дренируемым пологим склонам, покрытым разреженными сосновыми лесами, где с поверхности распространены однородные песчаные отложения. Доля протяженности таликовых зон в общей длине выполненных профилей составила 18.2 %, что намного превышает опубликованные ранее сведения. При допущении о репрезентативности выбранных профилей для ландшафтов сосновых лесов, доля площади Центральной Якутии, где распространены надмерзлотные талики, составляет около 2.3 %. Эта оценка является принципиально новым научным результатом, который уточняет имеющиеся представления о распространении сплошной многолетней мерзлоты в регионе, а также надмерзлотных подземных вод таликов.

Ключевые слова: надмерзлотный субаэральный водоносный талик, сплошная криолитозона, Центральная Якутия, мерзлотный ландшафт.

DISTRIBUTION OF SUPRAFROST TALIKS IN THE CONTINUOUS PERMAFROST ZONE OF CENTRAL YAKUTIA

L.S. Lebedeva*, I.I. Khristoforov, K.P. Danilov, I.V. Gorokhov

I – Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

* lyudmilaslebedeva@gmail.com

Abstract. The aim of the work was to assess the distribution of suprapermafrost subaerial taliks in Central Yakutia. Geophysical surveys were carried out using GPR along 90 profiles with a total length of more than 21 km to detect suprapermafrost taliks in Central Yakutia along the Lena and Aldan highways. On 25 profiles, taliks of various lengths and thicknesses from 3 to 20 m were found. All identified taliks are confined to well-drained gentle slopes covered with sparse pine forests, where homogeneous sandy deposits are found from the surface. The proportion of the length of talik zones in the total length of the completed profiles was 18.2%, which is much higher than previously published data. Assuming the representativeness of the selected profiles for landscapes of pine forests, the share of the area of Central Yakutia, where suprapermafrost taliks are widespread, is about 2.3%. This assessment is a fundamentally new scientific result, which clarifies the current understanding of the distribution of continuous permafrost in the region, as well as suprapermafrost talik groundwater.

Keywords: suprapermafrost subaerial aquifer talik, continuous permafrost zone, Central Yakutia, permafrost landscape.

В сплошной криолитозоне, к которой относится Центральная Якутия, мерзлые породы занимают, за малым исключением, всю территорию. Самыми распространёнными типами таликов в сплошной криолитозоне Центральной Якутии считаются гидрогенные подозерные и подрусловые. Считается, что коэффициент таликовости территории меняется от 0.07 до 4.7 % и связан, в первую очередь, с долей озёр (Балобаев и др., 2003). Единичные субаэральные талики площадью от единиц до нескольких десятков тысяч квадратных метров были обнаружены на сухих пологих песчаных склонах невысоких водоразделов, покрытых сосновым лесом, примерно в 20 км к югу от Якутска в бассейне р. Шестаковки, на четвертой (бестяхской) надпойменной террасе на правом берегу р. Лены, а также на безлесых массивах перевеваемых песков (Пономарева, 1999; Мониторинг..., 2002; Балобаев и др., 2003).

Согласно Мерзлотно-ландшафтной карте (2017), преобладающим типом растительности в исследуемом регионе являются лиственничные леса и редколесья, которые

занимают 69 % территории. Вторым по распространенности типом растительности являются сосновые и сосново-лиственничные леса, которые занимают 12.5 % территории. По литературным сведениям (*Варламов и др., 2021*) и данным авторов (*Лебедева и др., 2019*) известно, что температура мерзлоты в лиственничных лесах составляет, как правило, от -1 до -3 °С и ниже, тогда как температура пород в сосновых лесах выше и изменяется от 0 до -0.6 °С.

Целью работы являлась оценка распространения надмерзлотных субаэральные таликов в Центральной Якутии. Были выполнены геофизические съемки методом георадиолокации вдоль 90 профилей общей протяженностью более 21 км для обнаружения надмерзлотных таликов вдоль автомобильных дорог «Лена» и «Алдан». Все ключевые участки относятся к сосновым и сосново-лиственничным лесам.

Из 37 выбранных профилей на Лено-Вилуйском междуречье на 19 под сезонноталым слоем залегает многолетняя мерзлота, на 9 профилях выявлены надмерзлотные талики мощностью от 5 до 20 м, на пяти профилях регистрируется высокая вероятность наличия талых зон, на четырех профилях прослеживаются границы, интерпретация которых без дополнительных материалов затруднена. Выявленные талики сконцентрированы около р. Кенкеме (35–50 км от г. Якутск) и между реками Тангнары и Эйим (около 430 км от г. Якутска). По отношению протяженности обнаруженных таликовых зон к общей протяженности георадарных профилей, коэффициент таликовости составил 14.6 %.

Анализ распространения различных типов растительности вдоль ФАД «Вилуй» по мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия) масштаба 1: 1 500 000 (2017) показал, что 52 % трассы проходит по кустарниковым и кустарничково-зеленомошным лиственничным лесам, 26 % – по кустарничковым и кустарничково-зеленомошным сосново-лиственничным лесам, 18 % – по среднетаежной долинной растительности и 4 % – по кустарничковым и кустарничково-моховым сосновым лесам. Согласно терминам карты, выбранные профили располагаются в кустарничковых и кустарничково-зеленомошных сосново-лиственничных лесах. Если допустить, что выявленная доля распространения надмерзлотных таликов на исследованных профилях (14.6 %) репрезентативна для типа растительности «кустарничковые и кустарничково-зеленомошные сосново-лиственничные леса», которые занимают 26 % вдоль ФАД «Вилуй», то таликовость региона составляет более 3 % только за счет субаэральные таликов. Эта предварительная оценка превышает ранее опубликованные в литературе сведения о таликовости региона и не учитывает распространение гидрогенных и межмерзлотных таликов.

На Лено-Амгинском междуречье из 39 георадарных профилей на 12 профилях обнаружены талики мощностью до 18 м. Все профили с таликами расположены в сосновом

лесу. По отношению протяженности обнаруженных таликовых зон к общей протяженности георадарных профилей, коэффициент таликовости составил 22.1 %. Эта оценка не включает в себя субаквальные талики и превышает ранее опубликованные в литературе сведения о таликовости региона.

Среднее значение коэффициента таликовости сосновых и сосново-лиственничных лесов в Центральной Якутии составило 18.2 %, который определен по соотношению общей протяженности георадарных профилей, выполненных на всех ключевых участках в 2020–2022 г., к протяженности отрезков георадарных профилей, где обнаружены надмерзлотные субаэральные талики мощностью не менее 3 м. Эта оценка превышает опубликованные ранее значения в несколько раз.

Сосновые и сосново-лиственничные леса являются вторым по распространенности типом растительности в Центральной Якутии. Они занимают 12.5 % территории. При допущении, что 90 георадарных профилей общей протяженностью более 21 км репрезентативны для сосновых и сосново-лиственничных лесов региона, доля площади Центральной Якутии, где распространены надмерзлотные талики, составляет около 2.3 %. Эта оценка уточняет имеющиеся представления о распространении сплошной многолетней мерзлоты в регионе, а также надмерзлотных подземных вод таликов. Общий коэффициент таликовости может быть оценен, как сумма полученной доли надмерзлотных таликов к доле гидрогенных таликов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Якутского научного фонда, грант №22-17-20040.

Литература

- Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М. и др. Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования. – Новосибирск : Изд-во СО РАН: Филиал «ГЕО», 2003. – 138 с.
- Варламов С. П. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии / С. П. Варламов, Ю. Б. Скачков, П. Н. Скрябин. – Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2021. – 156 с.
- Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Надмерзлотные субаэральные талики в бассейне р. Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII, № 1. – С. 40–50.
- Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000 / Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Макаров В.С. и др.; гл. ред. М.Н. Железняк. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. – 2 л. Фонды ИМЗ.
- Мониторинг подземных вод криолитозоны / В.В. Шепелев, А.В. Бойцов, Оберман Н.Г. и др. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2002. – 172 с.
- Пономарева О.Е. Водоносные талики в песчаных отложениях бассейна нижнего течения р. Виллой // Криосфера Земли. – 1999. – Т. III, № 4. – С. 84–89.

РЕЗУЛЬТАТЫ КАРПОЛОГИЧЕСКОГО И ЭНТОМОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗОВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИЙ КРИОГЕННО-ЭОЛОВЫХ ЛАНДШАФТОВ

М.В. Михаревич^{1,2*}, С.А. Кузьмина³, А.Э. Басилян⁴,
В.М. Лыткин², А.Н. Васильева²

1 – Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и
минерального сырья, г. Новосибирск, Россия

2 – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

3 – Палеонтологический институт РАН, г. Москва, Россия,

4 – Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

*miharevich@yandex.ru

Аннотация. По результатам исследований отложений, сопоставляемых с МИС-2, в разрезах цокольной террасы р. Виллой, тукуланов Кысыл-Сыр и Усть-Буотамы в Центральной Якутии были установлены палеокарпологические и палеоэнтомологические комплексы. Проведен сравнительный анализ комплексов дьолкуминской и едомной свит. Установлено существование реликтовых для криохрона древесно-кустарниковых сообществ рефугиумов, развитие которых было обусловлено близостью водоемов и предположительно многолетнемерзлыми породами или ископаемыми льдами, как локальными водоупорами. Полученные результаты позволили существенно дополнить выполненные ранее на основе спорово-пыльцевого анализа палеогеографические реконструкции.

Ключевые слова: Центральная Якутия, едомная свита, дьолкуминская свита.

RECONSTRUCTION OF PERIGLACIAL AEOLIAN LANDSCAPES BASED ON CARPOLOGICAL AND ENTOMOLOGICAL ANALYSES

M. Miharevich^{1,2*}, S. Kuzmina³, A. Basilyan⁴,
V. Lytkin², A. Vasilieva²

1 – Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials, Novosibirsk,
Russia

2 – Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

3 – Paleontological Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

4 – Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*miharevich@yandex.ru

Abstract. Palaeocarpological and palaeoentomological assemblages have been identified in sediments correlated to MIS 2 from the Vilyui River cut terrace and the Kysyl-Syr and Ust-Buotama tukulans in Central Yakutia. A comparative analysis of the assemblages from the nedoma and volkuma formations has been carried out. Results indicate the existence of refugium tree and shrub communities relict for the cold period. They developed due to the proximity of water bodies, as well as presumably due to permafrost or fossil ice which acted as local aquicludes. This study adds to the existing palaeoenvironmental reconstruction based on spore-pollen analyses.

Keywords: Central Yakutia, yedoma unit, dolkuma unit.

Согласно палеогеографическим реконструкциям, выполненным на основе результатов спорово-пыльцевого анализа (Галанин, Павлова, 2019; Гитерман, 1963) в последний криохрон позднего неоплейстоцена происходило практически полное исчезновение древесной растительности. Однако спорово-пыльцевые спектры большей частью отражают зональные ландшафты. Пыльца реликтовых сообществ в рефугиумах зачастую не попадает в необходимое статистическое число для подсчета палиноморфа. В других случаях по причине единичности и спорадичности появления пыльцевых зерен таких растений в спектрах, они могут приниматься за переотложенные или дальнезаносные.

Ископаемые семенные комплексы в отличие от палинокомплексов отражают сообщества, развивавшиеся непосредственно на участке отбора образцов. Кроме того,

палеокарпологический материал позволяет с большей точностью отделить переотложенные от инситуальных остатков. Немаловажным для палеогеографических реконструкций является доведение большинства определений плодов и семян до вида.

Разная разрешающая способность палинологического и палеокарпологического методов иногда приводит к некоторым противоречиям в интерпретациях. Например, для последнего позднеплейстоценового термохрона результаты палеокарпологического анализа скорее дополняют существующие реконструкции (*Михаревич и др., в печати*), а для криохрона МИС-2 заметны отличия.

Выделение ископаемых семенных комплексов в ранее считавшихся немymi отложениями криогенно-эолового генезиса стало возможным благодаря целенаправленному поиску в 2020-2021 гг. перспективных линз и обогащению органическими остатками проб путем промывания сотен литров грунта в полевых условиях. Пробы отбирались из маломощных (до первых см) отложений короткоживущих водоемов в дефляционных понижениях дьолкуминской свиты в разрезах тукуланов Усть-Буотама и Кысыл-Сыр. В едомной свите, венчающей отложения цокольной террасы в нижнем течении р. Вилюй, пробы брались из всей толщи осадка.

В одном из трех образцов из отложений тукулана Кысыл-Сыр, сформировавшихся несколько позже OSL-ИК даты 18000 л.н. (*Галанин, Павлова, 2019*), найдены семена лиственницы (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.). В четырех из пяти образцов едомной свиты с радиоуглеродной датой 22000 ± 300 (*Галанин и др., 2015*), определены остатки ели (*Picea obovata* Ledeb.) и лиственницы; найдена также чешуйка кустарниковой березы (*Betula fruticosa* Pall.) (*Михаревич и др., в печати*). Во всех четырех образцах из отложений тукулана Усть-Буотама, сформировавшихся в интервале $28,1 \pm 2$ - $17,2 \pm 1,3$ и $17,2 \pm 1,3$ - $16,1 \pm 1,5$ т.л.н. (*Галанин и др., 2021*) установлены остатки лиственницы и ели, в двух образцах присутствуют орешки ольхи волосистой (*Alnus hirsuta* (Spach) Turcz. ex Rupr.).

Таким образом, в комплексе дьолкуминской свиты в составе лесобразующих пород встречаются виды, не характерные для современных тукуланов (ель, ольха), приуроченные, как правило, к поймам. Это может свидетельствовать о развеивании и эоловом переносе речных песков, однако видовой состав трав отличается от ранее установленного нами состава в комплексах аллювиальных отложений (*Михаревич и др., в печати*). Кроме того, сами диаспоридии имеют довольно хорошую сохранность, что маловероятно при переивании. Состав группы трав как в разрезе тукулана Усть-Буотама, так и Кысыл-Сыр сходен и характеризует сообщества, аналогичные современным на участках зарастания эоловых песков. Возможно, точки отбора образцов приходились на участки, граничащие с участками с аллювиальной аккумуляцией, откуда заносились диаспоридии произраставших

там ольхи и ели, однако следов пойменных отложений, аналогичных современным, не найдено. В изученных образцах едомной свиты в группе трав виды пионерных сообществ представлены слабее, отмечаются остатки лугово-лесных видов, безусловно инситуальными являются шишки хвойных. Следует также отметить присутствие немногочисленных водно-болотных видов в отдельных образцах как едомной, так и дьолкуминской свиты.

Таким образом, восстанавливается локальное развитие лиственничных и елово-лиственничных сообществ, иногда с ольхой в подлеске с разреженным нижним ярусом из пионерных видов по берегам водоемов, в полях аккумуляции дьолкуминской свиты. На участке формирования едомной свиты встречались разреженные елово-лиственничные сообщества с развитым травяным ярусом из лесолуговых, лугово-болотных видов. Находки ряда ксерофитных насекомых в едомной свите подтверждают разреженный характер леса и свидетельствуют также о существовании ксерофитных сообществ, возможно пирогенного происхождения. Мы предполагаем, что многолетнемерзлые породы или ископаемые льды, как локальные водоупоры, обеспечивая увлажненность сезонно-талого слоя в закрытых от ветров понижениях рельефа, благоприятствовали развитию реликтовых для данного времени древесно-кустарниковых сообществ. Возможно предположить существование долинных таликов в южной части Центрально-Якутской равнины, обеспечивающих развитие ольхи. Следует также добавить, что энтомофауна едомной свиты на р. Вилюй хотя имеет характерный для МИС 2 тундростепной характер, по видовому составу стоит близко к энтомофаунам северной Якутии, тогда как фауна из эоловых песков содержит ряд локальных видов.

Работы проведены за счет средств гранта РНФ № 21-17-00054 и гранта РФФИ № 20-04-00165.

Литература

Галанин А.А., Дьячковский А.П., Лыткин В.М., Бурнашева М.П., Шапошников Г.И., Куть А.А. Результаты определения абсолютного возраста образцов в радиоуглеродной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН // Наука и образование. – 2015. – № 4 (80). – С. 45–49.

Галанин А.А., Курбанов Р.Н., Шапошников Г.И., Васильева А.Н., Лыткин В.М. Новые данные о строении и возрасте бестяхской террасы р. Лены в окрестностях Якутска (Восточная Сибирь) // Пути эволюционной географии. Выпуск 2: Материалы II Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А.А. Величко (Москва, 22–25 ноября 2021 г.). – 2021. – С. 76–81.

Галанин А.А., Павлова М.Р. Позднечетвертичные дюнные образования (дьолкуминская свита) в Центральной Якутии (Часть 2) // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII, № 1. – С. 3–6.

Гитерман Р.Е. Этапы развития четвертичной растительности Якутии и их значение для стратиграфии. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 191 с.

Михаревич М.В., Кузьмина С.А., Васильева А.Н., Лыткин В.М., Базилян А.Э. Палеокарпологические комплексы отложений второй половины позднего неоплейстоцена района Кысыл-Сырского тукулана и его окрестностей (Центральная Якутия) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири (в печати).

ПРОДУЦИРОВАНИЕ И ЭМИССИЯ МЕТАНА В ДОМИНАНТНЫХ ЛАНДШАФТАХ ТИПИЧНОЙ И ЮЖНОЙ ТУНДРЫ ЗАПАДНОЙ АРКТИКИ

Г.Е. Облогов^{1,2*}, Н.А. Задорожная¹, А.А. Васильев^{1,2}, Г.В. Малкова¹

1 – Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия

2 – Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

**oblogov@mail.ru*

Аннотация. Приводятся результаты исследований содержания метана в породах слоя сезонного оттаивания и верхнего горизонта многолетнемерзлых пород в районе стационара Марре-Сале (западное побережье п-ова Ямал) и дельты р. Печора. Наибольшее количество метана характерно для заболоченных ландшафтов поймы и сильно увлажненных понижений на поверхности морской террасы. В хорошо дренированных ландшафтах метан в отложениях практически отсутствует. В верхней части мерзлоты содержание метана до 5-6 раз больше, чем в перекрывающем слое сезонного оттаивания. Большое количество метана содержится в суглинисто-глинистых отложениях морского генезиса, а также в пластовых льдах. Значительные потоки метана (до 10.7 мг·м⁻²·ч⁻¹) зафиксированы в заболоченных, либо сильно увлажненных поверхностях, занимающих примерно 45–50 % площади типичной тундры.

Ключевые слова: метан, многолетнемерзлые породы, подземные льды, эмиссия метана, Марре-Сале, устье реки Печора.

PRODUCTION AND EMISSION METHANE IN DOMINANT LANDSCAPES OF THE TYPICAL AND SOUTHERN TUNDRA OF THE WESTERN ARCTIC

G.E. Oblogov^{1,2*}, N.A. Zadorozhnaya¹, A.A. Vasiliev^{1,2}, G.V. Malkova¹

1 – Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia

2 – Tyumen State University, Tyumen, Russia

**oblogov@mail.ru*

Abstract. The results of studies of the methane content in the soils of the active layer and the upper horizon of permafrost in the area of the Marre-Sale station (the western coast of the Yamal Peninsula) and the Pechora River delta are presented. The greatest amount of methane is characteristic of swampy landscapes of the floodplain and moistened depressions on the surface of the marine terrace. In well-drained landscapes, methane is practically absent in sediments. In the upper part of the permafrost, the content of methane is up to 5-6 times higher than in the overlying active layer. A large amount of methane is contained in loamy sediments of marine origin, as well as in massive ice. Significant methane fluxes (up to 10.7 mg·m⁻²·h⁻¹) have been recorded from waterlogged or heavily moistened surfaces, occupying approximately 45–50 % of typical tundra area.

Keywords: methane, permafrost, ground ice, methane emission, Marre-Sale, Pechora River delta.

Последствия климатических изменений в последнее время широко обсуждаются. Арктический регион в данной связи имеет особое значение, так как здесь наблюдается наибольшее повышение температуры воздуха. При этом в Арктике в многолетнемерзлых породах и подземных льдах сохранены огромные запасы парниковых газов, которые при высвобождении непосредственно влияют на глобальный климат. Наиболее воздействующим на парниковый эффект газом считается метан (CH₄). Содержание метана в условиях Арктики достаточно высокое за счет изначально благоприятной среды для жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов, выступающих основными производителями метана. Деградация мерзлоты, содержащей в том числе подземные льды, вызывает изменение температурного режима верхних горизонтов многолетнемерзлых пород (ММП), увеличение мощности сезонно-талого слоя (СТС), перестройку ландшафтной структуры территорий и заболачивание территорий. Как следствие – расширяется зона метаногенеза, увеличивается эмиссия метана с поверхности. При этом совершенно недостаточно изучено содержание

метана в СТС, подстилающих горизонтах ММП и подземных льдах, которые и являются источниками потоков биогенного метана в атмосферу.

В районе типичной тундры западного побережья п-ова Ямал (Марре-Сале) и южной тундры в дельте р. Печоры (мыс Болванский, о. Кашин) нами проведены исследования содержания метана в породах СТС и верхнем горизонте мерзлоты (ВГМ), в многолетнемерзлых четвертичных отложениях и подземных льдах разного генезиса. Получены данные об эмиссии метана с поверхности доминантных ландшафтов в районе Марре-Сале (*Васильев и др., 2022; Задорожная и др., 2022; Oblogov et al., 2020*).

Дегазация образцов производилась методом «HeadSpace» (*Kampbell et al., 1989*). Для измерений удельных потоков CH_4 использовались кубические камеры с принудительным периодическим перемешиванием воздуха. Определение содержания метана проводилось на газовом хроматографе SHIMADZU GC 2014 в лаборатории ФГБУ ВНИИОкеангеология.

В Марре-Сале наибольшее содержание метана в СТС было зафиксировано на заболоченных ландшафтах средней и низкой поймы реки – около 1.5 мл/кг при максимальном значении 6.55 мл/кг. На основной поверхности третьей морской террасы высокое содержание метана в породах СТС получено в заболоченном понижении стока поверхностных вод (логе) – в среднем 1.54 ± 1.09 мл/кг (максимум 3.93 мл/кг), и на поверхности полигональной тундры – в среднем 0.76 ± 1.9 мл/кг (максимум 6.97 мл/кг). В хорошо дренированных ландшафтах (дренированная поверхность типичной тундры, песчаные раздувы и др.) содержание метана минимально – менее 0.1 мл/кг. В породах ВГМ до глубины около 3.5 м содержание метана практически везде больше (до 5-6 раз), чем в СТС (в среднем более 3 мл/кг). Максимальные содержания наблюдаются вблизи кровли слоя ВГМ и до 0.3-0.5 м глубже максимально зафиксированной мощности СТС. Ниже по разрезу содержание метана постепенно понижается.

В дельте реки Печора в талых породах СТС отмечено высокое содержание метана для слабодренированной кочковатой поверхности острова Кашин – около 1.2 мл/кг (максимум 2.5 мл/кг) и увлажненной поверхности полигонального заболоченного торфяника на мысе Болванском – около 1.1 мл/кг (максимум 1.9 мл/кг). Максимальные значения в мерзлых породах получены в береговом уступе острова Кашин, где среднее содержание CH_4 составило 8.15 ± 6.14 мл/кг (максимум 15.78 мл/кг). В целом, как и для Марре-Сале, содержание метана в мерзлых породах ВГМ выше, чем в талых породах СТС.

Проведены многочисленные определения содержания и распределения метана в различных геолого-генетических типах четвертичных многолетнемерзлых пород и подземных льдах, обнажающихся в береговом уступе в районе Марре-Сале. Наибольшее количество CH_4 содержится в суглинисто-глинистых отложениях морского генезиса

(в среднем около 2 мл/кг, максимум 6.77 мл/кг), залегающих в основании разреза и составляющих большую часть разреза. В вышележащих песчаных прибрежно-морских отложениях содержание CH_4 в среднем составляет около 0.5 мл/кг (максимум 6.75 мл/кг). В континентальных пылеватых супесях и песках озерно-болотного генезиса – в среднем около 0.9 мл/кг (максимум 3.81 мл/кг). В покровных мелко-тонкозернистых аллювиальных песках голоценового возраста метан практически отсутствовал. Высокие единичные значения содержания CH_4 установлены для подземных залежей льдов. В пластовых льдах, залегающих в аллювиально-морских (прибрежно-морских) и морских супесчано-песчаных и глинистых отложениях каргинского возраста получен абсолютный максимум содержания метана, составляющий 23.29 мл/кг, хотя в среднем содержание метана не превышает 1 мл/кг. В полигонально-жильных льдах (ПЖЛ) содержится небольшое количество CH_4 – в среднем около 0.1–0.6 мл/кг, максимум 1.1 мл/кг.

Характер распределения содержания CH_4 в мерзлых четвертичных отложениях и подземных льдах в районе Марре-Сале частично приближен к логнормальному распределению. Максимальные значения наблюдаются в основном в диапазоне 0.01–0.1 мл/кг.

Определены пиковые значения удельных потоков метана в атмосферу с поверхностей ландшафтов типичной тундры в районе Марре-Сале. Значительные потоки метана наблюдались для участков заболоченной поверхности низкой и средней поймы, заболоченных понижений стока поверхностных вод, заболоченных поверхностей озерных котловин, сильно увлажненных поверхностей полигональных понижений. Максимальное значение потока метана – $10.7 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, получено на средней пойме при температуре поверхности около $+20.0 \text{ }^\circ\text{C}$. На поверхностях слабоувлажненных и дренированных ландшафтов значения удельного потока метана всегда менее $0.1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Учитывая ландшафтную структуру района Марре-Сале, источниками существенной эмиссии метана являются 45–50 % территории.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант 22-27-00181).

Литература

Васильев А.А., Мельников В.П., Задорожная Н.А. и др. Содержание и эмиссия метана в типичных и южных тундрах западной Арктики // Доклады Академии наук. – Т. 505, № 1. – 2022. – С 114–119. DOI: 10.31857/S2686739722070179.

Задорожная Н.А., Облогов Г.Е., Васильев А.А. и др. Метан в мерзлых и оттаивающих отложениях западной Арктики // Криосфера Земли. – Т. 26, № 5. – 2022. – С. 41–55. DOI: 10.15372/KZ20220504.

Kampbell D.H., Wilson J.T., Vandegrift S.A. Dissolved Oxygen and Methane in Water by a GC Headspace Equilibration Technique // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. Vol. 36, no. 4 – 1989 – Pp. 249-257. DOI: 10.1080/03067318908026878.

Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskaya I.D. et al. Methane Content and Emission in the Permafrost Landscapes of Western Yamal, Russian Arctic // Geosciences. Vol. 10, no. 10 – 2020 – 412. DOI: 10.3390/geosciences10100412.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ GNSS-ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ СЪЁМКИ НАЛЕДИ С ПОМОЩЬЮ БПЛА

А. А. Осташов^{1,2,3*}, О. М. Макарьева², Н. В. Нестерова^{2,3}, А. А. Землянскова²

1 – *Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова, г. Якутск, Россия*

2 – *Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*

3 – *Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия*

**andrey.ostashov@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматривается оценка погрешностей получения абсолютных отметок поверхности наледи методом аэрофотосъемки. В качестве эталона выступают GNSS профили, расположенные перпендикулярно наледной поляне и позволяющие оценить величину ошибки. Работа выполнена на Анмангындинской наледи. В результате обработки одной съемки средняя ошибка определения высотных отметок поверхности наледи составляет +0,16 м, максимальная достигает +0,87 м.

Ключевые слова: наледь, аэрофотосъемка, спутниковая геодезия, Северо-Восток.

APPLYING GNSS PROFILES FOR VERIFICATION OF AUFESIS SURVEY USING UAV

A. A. Ostashov^{1,2,3*}, O. M. Makarieva², N. V. Nesterova^{2,3}, A. A. Zemlyanskova²

1 – *Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia*

2 – *St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

3 – *State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia*

**andrey.ostashov@gmail.com*

Abstract. The errors estimation of absolute aufeis surface marks obtaining by aerial photography is studying in this research. The GNSS profiles, located across aufeis field, are used to determine errors. The study was carried out on the Anmangynda aufeis. The average error in determining the height marks of the aufeis surface is +0,16 m, maximum is +0,87 m as the result of first survey processing.

Keywords: aufeis, aerial photography, satellite geodesy, North-East.

Одними из характерных объектов криолитозоны являются наледи. В последнее десятилетие отмечается изменчивость процессов наледообразования в различных природно-климатических условиях, которую можно использовать в качестве индикации комплексного состояния многолетней мерзлоты (Алексеев, 2016; Makarieva et al., 2019; Gagarin et al., 2020). В качестве современных методов изучения наледей широкое распространение получило использование БПЛА для производства детальных съёмок (Гагарин, 2018; Gagarin et al., 2020). Однако как и любой метод, он нуждается в верификации. Использование GNSS-оборудования в режиме RTK (Real Time Kinematic) позволяет уточнить плановые и высотные отметки поверхности наледи и осуществить оценку надежности выполненной съемки методом пространственного анализа. Для специфических зимних съемок поперечным профилированием можно решить задачу уточнения границ наледи, не различимой на съемке под снежным покровом, а также скорректировать высотную отметку поверхности наледи в зависимости от толщины снега.

Целью работы является оценка погрешностей получения абсолютных отметок поверхности наледи методом аэрофотосъемки (АФС) при помощи GNSS-профилирования.

Объектом исследования является Анмангындинская наледь, расположенная в бассейне р. Анмангында в районе 152–158 км Тенькинской трассы (Магаданская обл.) в

30 км к юго-востоку от пос. Усть-Омчуг. За полевые сезоны 2021–2022 гг. были проведены регулярные детальные крупномасштабные аэрофотосъемки поверхности наледи и наледной поляны, основной целью которых являлось определение морфометрических характеристик наледи.

Съемки проводились с помощью квадрокоптера DJI Phantom 4.0, оснащенного антенной AGNSS, что позволяет с высокой точностью (до 5 см) определять высотные отметки поверхности наледи. Всего выполнено 17 детальных съемок, по которым можно рассмотреть динамику площади наледи. Каждая съемка, при наличии возможности, сопровождалась измерениями абсолютных отметок поверхности наледи по назначенным поперечным профилям. Профили разбивались, опираясь на максимально возможную границу наледи, промерные точки расположены приблизительно через 20 м. Протяженность самого длинного профиля составляет 1,2 км.

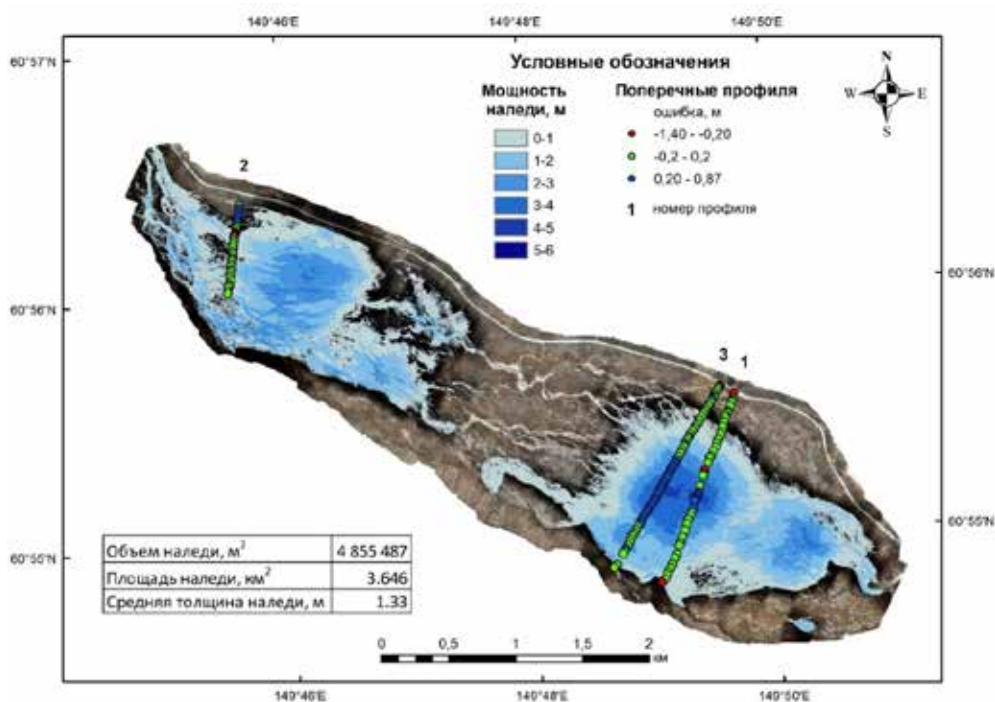


Рисунок 1. Пример верификации съемки по GNSS-профилю, Анмангындинская наледь, съемка выполнена 24.05.2021.

В качестве примера приведена оценка точности съемки 24.05.21 по 3 GNSS профилям (рис. 1), выполненным в день съемки. Сравнение поверхностей велось по 151 точке методом наложения профилей GNSS на поверхность, полученную по результатам аэрофотосъемки. Выявлены отклонения от $-1,396$ м (отметка по АФС ниже отметки по данным профиля) до $+0,87$ м. Отброшены грубые ошибки, связанные с резким перегибом рельефа, таким как скальный уступ, бровка берега временного водотока, уступ водопропускной трубы, а также связанных со съемкой реперов, закрепляющих профили на местности. Эти объекты

составляют большую часть отрицательных ошибок. Положительные ошибки приходится в основном на поверхность наледи и на участки наледной поляны, не покрытые наледью, представленные кочкообразным рельефом с кочками высотой около 20–30 см и покрытыми голубичниками. Часто данный тип местности прорезается сухими и обводненными руслами. Поверхность наледи с точки зрения отметок земной поверхности довольно однородна за исключением крутых берегов временных водотоков, на момент съемки способных достигать 0,5 м. Непосредственно на наледь пришлось 110 точек, средняя ошибка определения высотных отметок составляет +0,16 м, максимальная равна +0,87 м и приуроченная к середине профиля № 1. На рис. 1 можно обнаружить, что основные ошибки приурочены к серединам профилей № 1 и № 3 в местах самой высокой мощности наледи. Причиной таких искажений могла послужить специфическая для съемки поверхность наледи, а также сложность и новизна обработки таких объектов. Для понимания причин подобных отклонений необходимо проводить специальные точечные исследования, дальнейшее совершенствование и развитие методики.

Коллектив авторов искренне благодарит главу Тенькинского городского округа Магаданской области Дениса Анатольевича Ревутского за помощь в проведении исследований и обеспечении работы научной группы на территории округа.

Исследования проводятся при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект 75295776).

Литература

- Алексеев, В. Р. Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов / В. Р. Алексеев // Лёд и снег. – 2016. – 56 (1). – С. 73–92. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-73-92>.
- Гагарин, Л. А., Волгушева, Н. Э. Количественная оценка смещения оползня на участке федеральной автодороги А 360 «Лена» в Южной Якутии / Л. А. Гагарин, Н. Э. Волгушева // Применение БПЛА в географических исследованиях : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – 2018. – С. 46–51.
- Gagarin, L., Wu, Q., Melnikov, A., Volgusheva, N., Tananaev, N., Jin, H., Zhang, Z., Zhizhin, V. Morphometric Analysis of Groundwater Icings Intercomparison of Estimation Techniques, Remote Sens, 2020 12 18 <https://doi.org/10.3390/rs12040692>.
- Makarieva, O., Shikhov, A., Nesterova, N., Ostashov, A. Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia), Earth Syst. Sci. Data, 11, 409–420. <https://doi.org/10.5194/essd-11-409-2019>.

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ЛАНДШАФТОВ ЮЖНОЙ ТУНДРЫ – СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ОСОБЕННОСТЯМ РЕАКЦИИ НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

О.Е. Пономарева^{4,1*}, А.А. Губарьков¹, Д.С. Дроздов^{1,3,4}, А.Г. Гравис^{1,4}, Н.М. Бердников¹,
Е.В. Устинова^{1,2,3}

1 – *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия*

2 – *Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия*

3 – *Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия*

4 – *Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ), г. Москва, Россия*

* o-ponomareva@yandex.ru

Аннотация. Фоновый мониторинг на постоянных объектах по трансекте от южной тундры до северной тайги позволил оценить скорости и особенности изменения геофизиологических условий с 70-х гг. прошлого века. Выявлены различия в темпах повышения температуры мерзлых пород и глубин протаивания в северной и южной частях трансекты. Выявлены торфяники наиболее устойчивые к потеплению климата. В северной части трансекты температура пород поднялась на 2...3 °С, а глубина сезонного протаивания в среднем увеличилась на 25 см. В южной части трансекты температуры пород близки к 0 °С и относительно стабильны, расширяются ареалы с мерзлотой несливающегося типа на торфяниках с маломощным органическим слоем. Если мощность торфа превышает 1 м, торфяники слабо реагируют на современные изменения климата.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, среднегодовая температура воздуха и пород, потепление климата, мерзлота несливающегося типа.

DIFFERENTIATION OF THE WESTERN SIBERIA LANDSCAPES FROM THE SOUTHERN TUNDRA TO NORTHERN TAIGA BY THE SALIENT FEATURES TO CLIMATE CHANGE

O.E. Ponomareva^{4,1*}, A.A. Gubarkov^{1,2}, D.S. Drosdov^{1,3,4}, A.G. Gravis^{1,4}, N.M. Berdnokov¹,
E.V. Ustinova^{1,2,3}

1 – *Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Center of the SB RAS, Tyumen, Russia*

2 – *Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia*

3 – *Tyumen State University, Tyumen, Russia*

3 – *Russian State Geological Prospecting University (MGRI), Moscow, Russia*

* o-ponomareva@yandex.ru

Abstract. Background monitoring at permanent sites along the transect from the southern tundra to the northern taiga made it possible to estimate the rates and features of changes in geocryological conditions since the 1970s. last century. Differences in the rate of increase in the temperature of frozen rocks and thawing depths in the northern and southern parts of the transect were revealed. Peatlands most resistant to climate warming have been identified. In the northern part of the transect, the temperature of the rocks rose by 2...3 °C, and the depth of seasonal thawing increased by an average of 25 cm. In the southern part of the transect, the temperatures of the rocks are close to 0 °C and relatively stable; layer. If the thickness of peat exceeds 1 m, peatlands react poorly to modern climate changes.

Keywords: permafrost, average annual air and permafrost temperature, climate warming, deep permafrost table.

Тенденция к повышению температуры воздуха отмечалась в Западной Сибири уже с середины 60 гг. XX века, и составляла в 1961–1990 гг. 0,04 градуса в год. В последующие 32 года (период с 1991 по 2022 гг.) по данным метеостанции Надым тренд увеличился до 0,07 градуса в год (среднегодовые температуры воздуха возросли с –5,6 °С до –3,5 °С) (рис. 1). Повышение температуры происходило как в период с отрицательными температурами, так и в период с положительными температурами. Значительно, на 24 дня

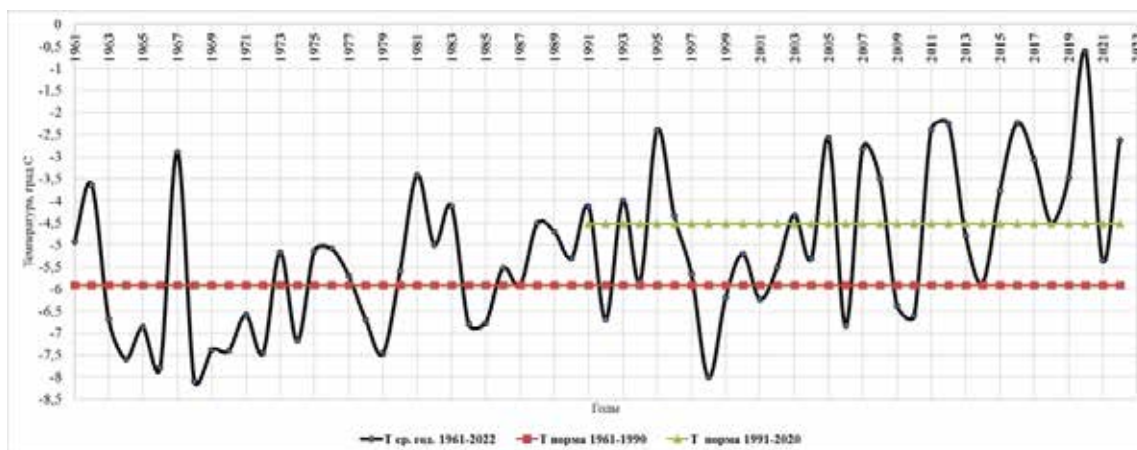


Рисунок 1. Изменение среднегодовой температуры воздуха с 1961 по 2022 гг. по данным метеостанции Надым по сравнению с нормой 1961–1990 гг. и нормой 1991–2020 гг.

увеличилась длительность теплого периода. Возросло и количество выпадающих атмосферных осадков, особенно зимних. Вышеназванные изменения климата обусловили трансформацию геокриологических условий. В северной части трансекты, в южной тундре (сплошное распространение ММП) произошло повышение температуры ММП на 2-3 °С: с $-5,9$ до -3 ($-3,4$)°С (рис. 2). Мощность сезонноталого слоя (СТС) в минеральных грунтах увеличилась с 90 до 120 см. На торфяниках центральной части трансекты, в южной лесотундре (прерывистая мерзлота) температуры ММП поднялись с $-2,2$ ($-3,5$) до $-0,7$ ($-0,9$) °С, на 1,5–2 °С. Максимальные изменения отмечались на буграх пучения, минимальные – на торфяниках. Мощность СТС на торфяниках возросла с 90 до 125 см. В южной части трансекты, в северной тайге (прерывистое и островное распространение ММП), где мерзлота приурочена преимущественно к торфяникам и буграм пучения, температуры пород составляют $-0,1...-1,0$ °С. Глубины протаивания на торфяниках с маломощным органическим слоем (менее 50 см) достигают 180–200 и более см, кровля ММП залегает здесь на глубинах 2 (3–7) м. Ареалы мерзлоты несливающегося типа на таких торфяниках стремительно расширяются, при этом происходит тепловая осадка поверхности, величины которой определены во многих местах по замоканию ягеля и инструментально на 1 наблюдательной площадке. Тепловая осадка на этой поверхности с 2004 года составила 23 см. В 2022 г. были обследованы и отобраны для мониторинга мощности СТС 6 новых площадок. Отрыв сезонной мерзлоты от многолетней носит возвратно-поступательный характер, также, как и осадка поверхности. После холодных зим местами происходит слияние сезонной и многолетней мерзлоты. Местами возможны новообразования мерзлоты. Наблюдения выполняются по протоколу CALM. Установлено, что в том случае, если естественный растительный покров торфяников не нарушен и мощность органического слоя равна или превышает 100 см, глубины протаивания составляют в среднем 70–75 см (от 30–

40 см до 140–180 см), и на таких торфяниках не происходит отрыв сезонной мерзлоты от многолетней. Такие торфяники являются устойчивыми к изменению климата.

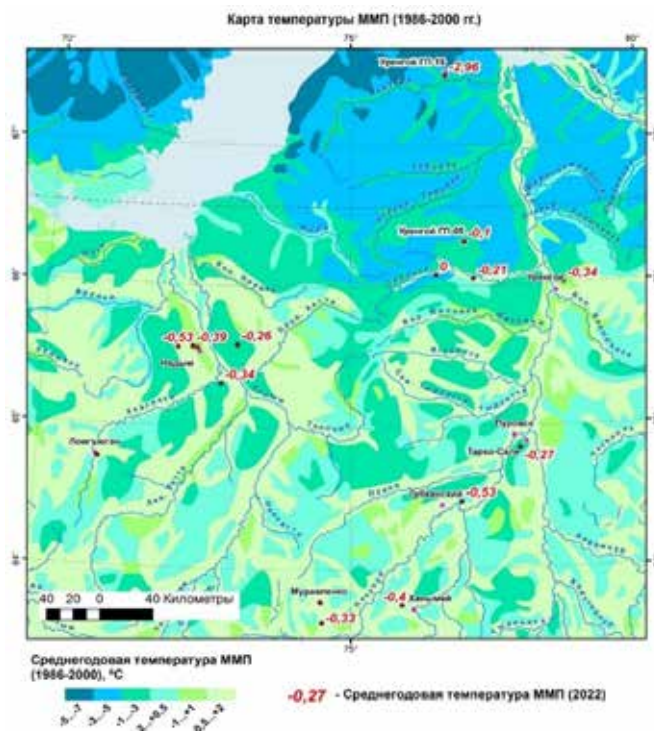


Рисунок 2. Актуальные и фоновые температуры многолетнемерзлых пород вдоль трансекты.

Выводы:

1. Актуальная температура ММП в северной части трансекты близка к -3°C и постепенно увеличивается, в южной близка к 0°C и относительно стабильна.

2. Глубины сезонного протаивания грунтов в северной части трансекты близки к 120–130 см и медленно увеличиваются, в южной зависят от мощности органического слоя.

3. По мощности органического слоя и особенностям изменения геокриологических условий торфяники южной части трансекты можно разделить на 3 группы:

- с мощностью торфа менее 50 см (на них образовалась мерзлота несливающегося типа, происходит тепловая осадка поверхности);
- с мощностью торфа более 100 см (устойчивые к изменению климата ландшафты);
- с мощностью торфа от 50 до 100 см. Устойчивость последних определяется высотой снежного покрова, глубиной залегания первого от поверхности водоносного горизонта, особенностями растительного покрова.

Работа выполнена при финансовой и логистической поддержке Научного центра изучения Арктики и в рамках гос. задания по проекту № 121041600042-7.

МИКРОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЕДОМНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА АРХИВНЫЕ ДАННЫЕ

Т.В. Романис*, В.Е. Тумской

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

**romanis.tatyana@yandex.ru*

Аннотация. Проведено изучение микростроения едомных отложений Быковского полуострова и Ойогосского Яра в архивных шлифах. Использование современного подхода в диагностике элементов микростроения показало отсутствие прямых доказательств эолового генезиса отложений. Отложения Быковского полуострова можно классифицировать как криопедолит без признаков эпигенных почв, в то время как в образцах Ойогосского Яра есть элементы педогенной дифференциации. Более того, как показывают работы последних лет, возраст изученной в шлифах части отложений ледового комплекса на Быковском полуострове примерно от 35–30 до 15–12 тыс. л.н., тогда как на Ойогосском Яре – древнее 35 тыс. л.н., что делает некорректным использование этих разновозрастных толщ для определения единого микроморфотипа.

Ключевые слова: криопедолит, эпигенная почва, Быковский полуостров, Ойогосский Яр, агрегация.

MICROMORPHOLOGICAL PEDOFEATURES OF YEDOMA DEPOSITS: A NEW PERSPECTIVE ON ARCHIVE DATA

T.V. Romanis*, V.E. Tumskoy

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

**romanis.tatyana@yandex.ru*

Abstract. In this research we return to the micromorphological study of the yedoma deposits. The main objects are archival thin sections of Bykovsky Peninsula and the Oyogos Yar. These materials have been collected T.V. Tursina, E.M. Naumov and S.V. Tomirdiaro. The use of a modern approach in the diagnostics micromorphological features showed the absence of direct evidence of the eolian genesis of the deposits. Moreover, recent studies show that the age of the section of ice complex sediments studied on the Bykovsky Peninsula and Oyogosky Yar are different. The data cannot be combined to describe the micromorphotype of the buried soils.

Keywords: cryopedolite, epigenetic soil, Bykovsky Peninsula, Oyogosky Yar, aggregation.

Данные о микростроении почв едомных отложений, озвученные на 27-м Международном геологическом конгрессе Т. В. Турсиной, Е. М. Наумовым и С. В. Томирдиаро (*Наумов и др., 1984*) закрепили представление об их эоловом генезисе и типе педогенеза погребенных почв, характерном для аридного климата. Авторы особо выделяли такие признаки микростроения, как агрегированность эолового типа, не объясняя, однако, ее морфологические критерии, отсутствие глинистых образований и аккумуляций, особое распределение карбонатов. Шлифы, положенные в основу их работы, сохранились в шлифотеке Почвенного института им. В. В. Докучаева, что позволило вернуться к ним в настоящее время и получить снимки признаков микростроения на современном оборудовании. Целью данной работы является оценка информативности данных архивных шлифов с применением международного подхода к диагностике элементов строения (*Герасимова и др., 2011; Stoops et al., 2018*). Особенность микростроения отложений Быковского полуострова – хорошо агрегированный зернистый материал как на глубине 2 м (рис. 1, а), так и по всему профилю до глубины 20 м. Доминируют зернистые гумусово-пылевато-глинистые агрегаты размером от 50 до 250 мкм, округлые и слегка вытянутые.

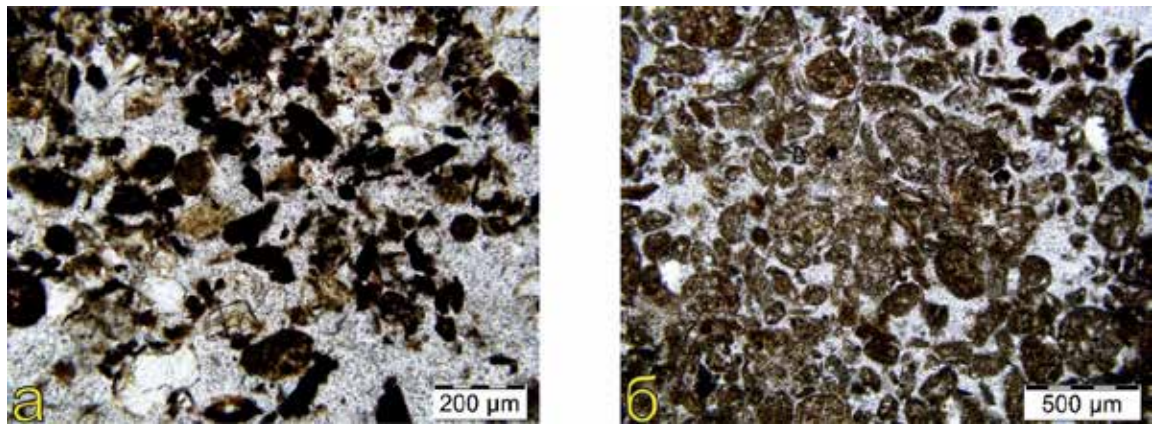


Рисунок 1. Особенности микростроения едомных отложений: а – зернистые агрегаты в слое на глубине 2 м (Быковский п-ов, съемка без анализатора); б – комковато-зернистая агрегация в слое на глубине 7 м (Ойогосский Яр, съемка без анализатора).

Подобные небольшого размера агрегаты описаны в мерзлотных почвах Большеземельской тундры (Арчегова, 1972) и гумусово-аккумулятивном горизонте промерзающих каштановых почв Монголии (Stoops et al., 2018), а их генезис связывают с коагуляцией соединений при сезонном промерзании. В сложных порах-упаковках диагностировано обилие растительных остатков размером 200–250 мкм. Формирование растительных остатков заданного диапазона размеров в результате циклического промерзания было показано при формировании криогумусового горизонта (Коноплянникова, 2021). С глубиной количество растительных остатков уменьшается, размер их существенно не меняется. В горизонте на глубине 16 м есть микритовые нодулы с нерезкими границами. Эти нодулы были изначально сформированы в другой среде и впоследствии растворились в пределах сезонно-талого слоя в летний период. Слабые следы разрушения сохранились в виде зубчатой границы. По совокупности признаков микростроения обнажение Быковского полуострова представляет собой классический криопедолит без включения эпигенных почв.

Микростроение отложений обнажения Ойогосский Яр отличается от Быковского полуострова. Во-первых, есть горизонты с комковато-зернистым микростроением. Помимо зернистых агрегатов диагностированы гумусово-пылевато-глинистые и пылевато-глинистые округлые и вытянутые агрегаты размером 0,5 мм (рис. 1, б). Генезис таких агрегатов в промерзающих почвах носит дискуссионный характер и может объясняться в погребенных почвах как биологической, так и специфической криогенной активностью (Stoops et al., 2018). Других следов биогенной активности (ходов мезофауны и биотурбаций, экскрементов клещей) в шлифах обнаружено не было. Растительных остатков в горизонтах содержится меньше, их размер от 50 до 250 мкм, они часто ожелезненные. Кристаллические нодулы обнаружены только в одном слое, находящемся на глубине 10 м, но они железо-карбонатные, а их форма и размер разнообразнее – от 50 до 200 мкм. Края микритовых нодул –

зубчатые, что также свидетельствует об этапе растворения. С ними соседствуют железоглинистые нодулы с резкими границами. В целом, признаки микростроения свидетельствуют о краткосрочных периодах переувлажнения, сопровождавшихся активностью бактерий, которые формировали железистые пленки на карбонатах. Температуры при формировании педогенных признаков в отложениях разреза Ойогосский Яр были выше +5 °С, то есть они формировались в пределах сезонно-талого слоя в летний период.

Использование современного подхода для диагностики микростроения шлифов Т. В. Турсиной, Е. М. Наумова и С. В. Томирдиаро показало отсутствие прямых доказательств эолового генезиса отложений на основе микроморфологических признаков. Более того, возможность простого сравнения и обобщения имеющихся материалов из этих двух разрезов вызывает возражения. Мало того, что они расположены в различных геолого-геоморфологических условиях, но они имеют и разный возраст. Как показывают работы последних лет, возраст толщи отложений, изученной в архивных шлифах на Быковском полуострове – примерно от 35–30 до 15–12 тыс. л.н., тогда как на Ойогосском Яре – древнее, 35 тыс. л.н.

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

Авторы выражают благодарность д.с.-х.н. М. П. Лебедевой за возможность работы с архивными шлифами, С. В. Губину за терпение и консультации, д.б.н. А. О. Макееву за бесценную дискуссию. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-00176)

Литература

- Арчегова, И. Б. Особенности гумусообразования в почвах Воркутинской тундры / И. Б. Арчегова // Науч. докл. Коми фил. АН СССР. – Сыктывкар, 1972. – 60 с.
- Герасимова, М. И., Ковда, И. В., Лебедева, М. П., Турсина, Т. В. Микроморфологические термины как отражение современного состояния исследований микростроения почв / М. И. Герасимова [и др.] // Почвоведение. – №. 7 – 2011. — С. 804–817.
- Наумов, Е. М., Турсина, Т. В., Томирдиаро, С. В. К вопросу генезиса ледово-лессовых едом и сингенетичных им палеопочв Северо-Востока Евразии / Е. М. Наумов, Т. В. Турсина, С. В. Томирдиаро // Материалы 27-го международного геологического конгресса. – М.: Наука, 1984 – С. 148–149.
- Конопляникова, Ю. С. Морфогенез криоаридных почв Юго-Восточного Алтая: Дисс. ... канд. биол. биологических наук / Ю. С. Конопляникова. – Москва, 2021. – 239 с.
- Stoops, G., Marcelino, V., Mees, F. (ed.). Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. – Elsevier, 2018 – 982 p.

ПОТЕПЛЕНИЕ И ОТТАИВАНИЕ МЕРЗЛОТЫ НА АЛЯСКЕ: ДИНАМИКА И ПОСЛЕДСТВИЯ

В.Е. Романовский^{1,2*}

1 – Университет штата Аляска, Геофизический институт, Фэрбенкс, Аляска, USA

2 – Тюменский научный центр СО РАН, Институт криосферы Земли, г. Тюмень, Россия

**veromanovsky@alaska.edu*

Аннотация. В докладе представлены материалы мониторинговых наблюдений за температурой многолетнемерзлых пород на Аляске за последние 40 лет. На фоне общего повышения температуры мерзлоты наблюдаются многолетние флуктуации, различающиеся по времени и по длительности для различных регионов распространения многолетнемерзлых пород на Аляске. В докладе также проиллюстрированы случаи негативного воздействия оттаивания мерзлоты на инженерные сооружения и обсуждаются подходы регионального моделирования динамики мерзлоты.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, потепление климата, мерзлотное моделирование.

WARMING AND THAWING OF PERMAFROST IN ALASKA: DYNAMICS AND COSEQUENCES

V.E. Romanovsky^{1,2*}

1 – University of Alaska Fairbanks, Geophysical Institute, Fairbanks, Alaska, USA

2 – Earth's Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Center SB RAS, Tyumen, Russia

**veromanovsk.y@alaska.edu*

Abstract. The report presents materials on permafrost temperature monitoring in Alaska over the past 40 years. Against the background of a general increase in permafrost temperature, multiyear fluctuations are observed, which differ in time and in duration for different regions of permafrost distribution in Alaska. The paper also illustrates cases of negative impacts of thawing permafrost on engineering structures and discusses approaches to modeling of permafrost dynamics on a regional level.

Keywords: permafrost, climate warming, permafrost modeling.

Воздействие потепления климата на вечную мерзлоту и потенциал климатических обратных связей, возникающих в результате оттаивания вечной мерзлоты, в последнее время привлекают к себе повышенное внимание. Потепление климата способствует повышению температуры вечной мерзлоты и увеличению толщины активного слоя, что, в свою очередь, влияет на стабильность северных экосистем, угрожает инфраструктуре и вызывает выброс дополнительного количества двуокси углерода и метана в атмосферу. Сроки и скорость деградации вечной мерзлоты – два основных фактора, определяющих ожидаемое негативное воздействие потепления климата на арктические экосистемы и инфраструктуру. В данной презентации будут представлены результаты почти 40-летних наблюдений за поведением мерзлоты и температурой и глубиной активного слоя на Аляске (рис. 1). Большинство мониторинговых станций на Аляске показывают значительное потепление вечной мерзлоты с 1980-х годов. Величина потепления варьировалась в зависимости от места, но обычно составляла от 0,5 до 4° С. Однако это потепление не было линейным во времени и пространственно однородным. В то время как на Северном склоне Аляски потепление вечной мерзлоты было более или менее непрерывным и составляло от 0,2 до 1 °С за каждое десятилетие, во внутренних районах Аляски в 2000-х годах началось небольшое похолодание, которое продолжилось в первой половине 2010-х годов (рис. 2).

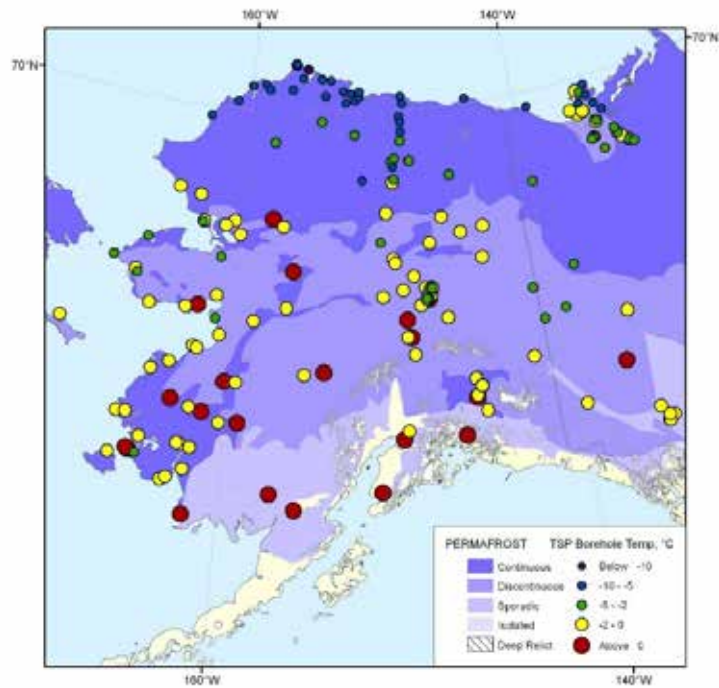


Рисунок 1. Распределение сети наблюдений за вечной мерзлотой лаборатории UAF на Аляске. Также показана температура вечной мерзлоты на каждом участке.

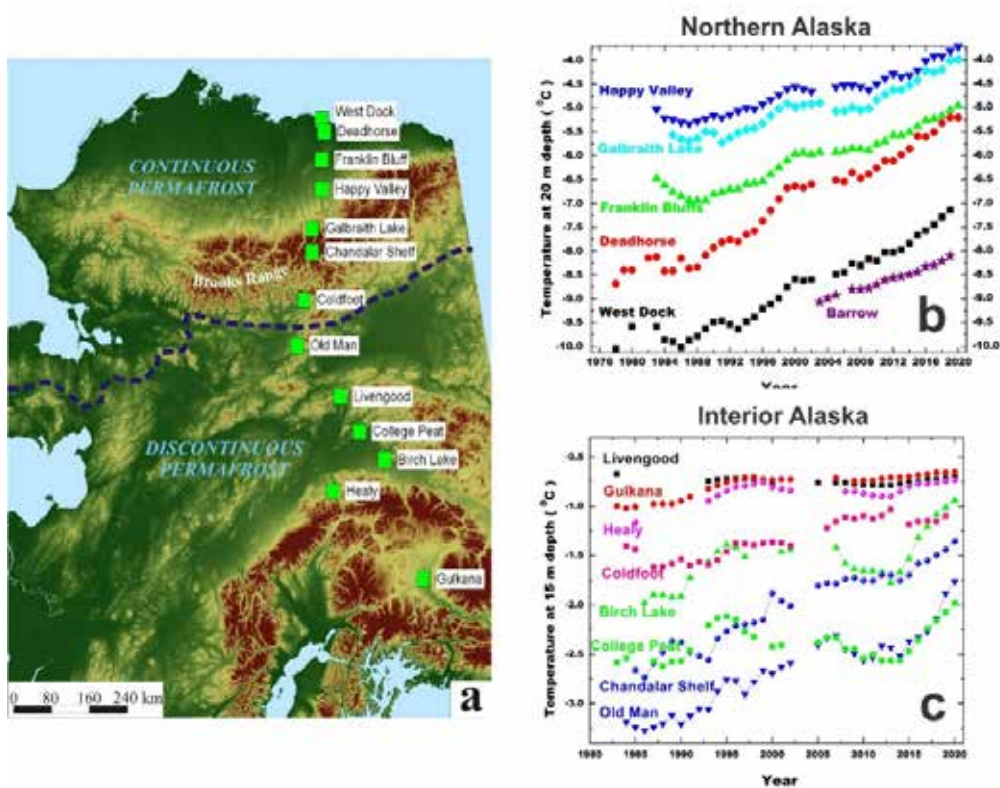


Рисунок 2. Карта распространения вечной мерзлоты на Аляске (зоны сплошной и прерывистой вечной мерзлоты разделены прерывистой синей линией) и расположение транsekты с севера на юг участков измерения температуры вечной мерзлоты (а); временные ряды среднегодовой температуры на глубине 20 м (b) и 15 м (c) ниже поверхности грунта, соответственно, на участках измерений.

Потепление возобновилось в середине 2010-х годов. К 2020 году во всех точках были зарегистрированы новые рекордные максимумы за весь период измерений температуры на глубине 15 и 20 м. Это потепление вызвало деградацию приповерхностной вечной мерзлоты и развитие талика во многих местах во внутренних районах Аляски и на северо-западе Аляски с негативными последствиями для устойчивости поверхности земли. Талик начинает формироваться, когда глубина потенциального сезонного оттаивания грунта превышает глубину потенциального промерзания. В презентации будут даны определения потенциального сезонного промерзания и оттаивания и приведены примеры для различных экологических условий. Также будут представлены некоторые примеры разрушительного воздействия оттаивающей вечной мерзлоты на инфраструктуру.

Для улучшения нашего понимания возможных будущих темпов и путей деградации вечной мерзлоты, а также для прогнозирования местных, региональных и глобальных последствий для человеческого общества, необходимы точные модели вечной мерзлоты с высоким пространственным разрешением. Создание таких моделей возможно только путем интеграции имеющихся экологических данных высокого разрешения и ассимиляции существующих данных полевого и дистанционного зондирования и наблюдений в эти модели. Результаты приложения специализированной модели динамики вечной мерзлоты высокого разрешения GIPL2 будут использованы для иллюстрации того, как изменения климата вместе с дальнейшим промышленным освоением Северного склона Аляски повлияют на вечную мерзлоту и экосистемы в этом регионе.

СОВРЕМЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ НОРМЫ ЯКУТИИ

Ю.Б. Скачков*

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

**ubskachkov@mpi.ysn.ru*

Аннотация. Рассчитаны новые климатические нормы среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков для 97 метеостанций Якутии за период 1991–2020 гг. На всех станциях среднегодовые нормы температуры воздуха повысились по сравнению со старыми (1961–1990 гг.). Изменения: от 0,7 до 2,0 °С. В среднем для Якутии нормы выросли на 1,4 °С. Самые высокие нормы отмечены в Витиме (–4,0 °С) и Ленске (–4,9 °С), а самые низкие в Делянке (–15,3 °С) и Оймяконе (–14,9 °С). В отношении осадков нет однозначности. Наименьшие нормы годовой суммы осадков отмечены в Бухте Амбарчик (131 мм) и на Острове Котельный (157 мм), наибольшие – в Алдане (747 мм) и в Нагорном (617 мм).

Ключевые слова: климатическая норма, температура воздуха, сумма осадков.

CURRENT CLIMATIC NORMALS FOR YAKUTIA

Y.B. Skachkov*

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

** ubskachkov@mpi.ysn.ru*

Abstract. New climatic normals of mean annual air temperature and annual precipitation over the 1991-2020 interval have been computed for 97 weather stations in Yakutia. The mean annual air temperature normals are 0.7 to 2.0 °C

higher for all stations compared to the 1961-1990 normals, with an average rise of 1.4 °C for Yakutia. The highest normals are for Vitim (−4.0 °C) and Lensk (−4.9 °C), while the lowest are for Delyankir (−15.3 °C) and Oymyakon (−14.9 °C). Precipitation changes are less consistent. The annual precipitation normals are lowest for Ambarchik Bay (131 mm) and Kotelny Island (157 mm) and highest for Aldan (747 mm) and Nagorny (617 mm).

Keywords: climatic normal, air temperature, total precipitation.

Климатические нормы широко используются в геотеплофизических и теплотехнических расчетах и прогнозах. Они также необходимы для проектирования и строительства. Наиболее востребованными климатическими элементами являются температура воздуха и атмосферные осадки.

Под понятием «норма» в статистике понимается средняя величина по всему ряду какого-то показателя. В климатологии чаще всего это средняя многолетняя величина: среднее месячное или годовое количество осадков; средняя суточная, месячная, годовая температура воздуха.

С 1 июля 2022 года подведомственные учреждения Росгидромета перешли на использование в оперативно-производственной практике климатических норм, рассчитанных за 1991–2020 годы. Ранее базовым являлся период 1961–1990 гг. По регламенту Всемирной метеорологической организации (ВМО) период осреднения значений метеорологических параметров для получения норм составляет 30 лет.

Актуализированные климатические нормы при сравнении с прошлыми базовыми периодами отражают наблюдающееся потепление климата.» (*Сайт Росгидромета, 2022*). Первую карту среднегодовой температуры воздуха обнародовала М.К. Гаврилова. В работе (*Гаврилова, 1981*) использовались данные метеостанций, полученные до 1960 г. Позднее (*Павлов, Малкова, 2005*) на территорию криолитозоны России была сделана карта нормы среднегодовой температуры воздуха. Период осреднения составил 1951–1980 гг. От Якутии были взяты данные 25 метеостанций.

Современные нормы нами были рассчитаны на основе базы данных метеорологических величин, находящейся в свободном доступе в Интернете (*Сайт ВНИИГМИ-МЦД*). Взяты были данные всех действующих в настоящее время метеостанций Якутии (97). На всех станциях среднегодовые нормы температуры воздуха повысились по сравнению со старыми (1961–1990 гг.). Изменения составили от 0,7 до 2,0 °C. В среднем для Якутии нормы выросли на 1,4 °C. Самые высокие нормы отмечены в Витиме (−4,0 °C) и Ленске (−4,9 °C), а самые низкие в Делянке (−15,3 °C) и Оймяконе (−14,9 °C). На основе расчетов построена карта (рис. 1). Чтобы не перегружать карту, на нее были нанесены данные всего лишь 44 станций. Но даже такое количество дает наглядное представление о пространственных различиях нормы.



Рисунок 1. Карта нормы среднегодовой температуры воздуха Якутии, °С.

В теплый период года (май – сентябрь) изменения норм меньше, чем в холодный. В качестве примера приведем данные по г. Якутске (таблица).

Старые (1961–1990 гг.) и новые (1991–2020 гг.) нормы температуры воздуха в г. Якутске, °С

Годы	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1961–1990	-40,9	-35,9	-21,5	-6,1	6,7	15,4	18,7	14,9	5,7	-8,6	-29,2	-38,8	-10,0
1991–2020	-36,9	-32,9	-19,2	-3,7	8,0	17,0	19,8	15,6	6,3	-6,9	-25,9	-37,0	-8,0
Разность	4,0	3,0	2,3	2,4	1,3	1,6	1,1	0,7	0,6	1,7	3,3	1,8	2

Десять самых теплых лет в Якутске за всю историю метеонаблюдений отмечены в последние 15 лет. Причем в эти годы среднегодовые температуры были выше новой нормы.

Для 87 метеостанций Якутии вычислены новые нормы (1990–2020 гг.) среднегодовых сумм осадков (рис. 2). Наибольшее повышение норм отмечено в Южной и Юго-Западной Якутии: в Алдане (90 мм), Учуре (89 мм), Канку (80 мм), Чульмане (73 мм), Тяне (65 мм), Ленске (64 мм), Нагорном (57 мм) и на некоторых станциях в других районах: Жиганске (77 мм), Черском (69 мм), Джарджане (63 мм), Сангаре (56 мм). На ряде станций зарегистрировано уменьшение норм: в Чурапче (на 67 мм), Токко (на 49 мм), Остров Столб (на 46 мм). На 32 станциях изменения норм (менее 10 %) в ту или иную сторону произошли незначительно.



Рисунок 2. Карта нормы годовой суммы осадков Якутии, мм.

Литература

Гаврилова М.К. Современный климат и вечная мерзлота на континентах. – Новосибирск: Наука, 1981. – 113 с.

Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России: Альбом мелкомасштабных карт. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2005. – 54 с.

Сайт Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД). Источник: ВНИИГМИ-МЦД. Электронный ресурс. Код доступа: <http://meteo.ru/>.

Сайт Росгидромета <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/28963/>.

ГИДРОГЕННАЯ КАТАСТРОФА ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ НА РУБЕЖЕ ПЛЕЙСТОЦЕНА И ГОЛОЦЕНА

В.Б. Спектор*

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

**vspektor@mail.ru*

Аннотация. В полосе приморских территорий Якутии широко распространены образования катастрофических водных потоков, представленные системами форм ориентированного рельефа. Строение их рассматривается на примере о. Арга-Муора-Сисе, расположенного в дельте р. Лены. Эти формы представляют собой радиально-концентрические конусы выноса размерами порядка 100 x 100 км, состоящие из широких (до первых десятков км) дугообразных валов и депрессий амплитудой десятки метров, цепочек радиально ориентированных озерных котловин, разделяющих их валообразных поднятий, линейных долин водотоков и др. мелких форм. Положительные формы рельефа сложены мелкозернистыми косослоистыми хорошо сортированными песками, возраст которых определен в пределах раннего-позднего дриаса. Причиной катастрофических потоков, вероятно, является разрушение предполагаемого Арктического шельфового ледника.

Ключевые слова: фладстрим, диллювий.

HYDROGENOUS CATASTROPHE IN EASTERN ARCTIC AT THE BOUNDARY BETWEEN PLEISTOCENE AND HOLOCENE

V.B. Spektor*

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

vspektor@mail.ru

Abstract. Systems of oriented relief forms resulted from catastrophic water flows are widespread over the maritime territories of Yakutia. Their structures are considered by an example of Arga-Muora-Sise Island in the Lena River Delta. These forms represent radially concentric fans ranging in the order of 100x100 km in size. They consist of wide (first tens of km) arc-shaped ridges and depressions (tens of meters), chains of radially oriented lake hollows and ridge-like elevations separating them, linear stream valleys and other minor landforms. Positive landforms are composed of fine obliquely laminated sands that have been dated within Oldest-Younger Dryas. The cause of catastrophic flows likely was a breakdown of the assumed Arctic ice shelf.

Keywords: floodstream, diluvium.

Побережье морей Восточной Арктики, Лаптевых и Восточно-Сибирского на рубеже плейстоцена и голоцена испытало воздействие катастрофических потоков (фладстримов). В результате на ряде площадей был сформирован ориентированный рельеф, размыты ранее накопившиеся отложения и образована толща осадков этих потоков (диллювий). Рассмотрение форм рельефа и отложений этого отрезка истории приводится на примере наиболее изученного участка побережья Якутии – дельты р. Лены. Аналогичные формы рельефа и отложения наблюдались нами также в бассейнах нижнего течения рек Яны, Индигирки и Колымы.

Районирование дельты. В области дельты р. Лены по генезису рельефа можно выделить три крупных геоморфологических района: аллювиальный, диллювиальный и равнинно-островной. Район практически сплошного распространения *аллювиальных форм* занимает восточную часть области дельты, к востоку от протоки Бол. Туматская. Район развития *равнинно-островных форм* располагается к югу от о. Арга-Муора-Сисе вдоль правого берега Оленекской протоки.

Район *диллювиально-аккумулятивных форм (образований катастрофических потоков)* – о. Арга-Муора-Сисе (сокращенно район Арга) занимает северо-западную часть

области дельты, к западу от протоки Мал. Туматская и к северу от протоки Арынская. Район Арга в плане представляет собой конус, ограниченный дугообразной ступенью, выпуклой в юго-западном направлении (со стороны моря на сушу). Структура рельефа конуса – *радиально-концентрическая*, свойственная конусам выноса. *Концентрические элементы форм рельефа* конуса Арга представлены разновысотными вложенными друг в друга дугами-ступенями радиусом 30–100 км, аналогично ориентированными дугообразными гирляндами озер и др. более мелкими формами.

Отложения конуса Арга представлены песками, которые обычно разделяются на две толщи: «верхние пески» и «нижние пески». *Верхняя толща («верхние пески»)* представлена мелкозернистыми хорошо сортированными, косо-волнистослоистыми мерзлыми песками. Отложения характеризуются массивной криогенной текстурой, указывающей на эпигенетическое промерзание (Григорьев, 1993). Наклон слоев достигает 35°, но чаще равен 5–15°. Минералогический состав тяжелой фракции (Schwamborn, 2004) (пироксен-амфибол-гранатовая ассоциация) сходен с «нижними песками». Коэффициент сортировки 0,8–1,4 (хорошо или умеренно сортированы) выше, чем «нижние пески». Характерной чертой «верхних песков» является низкое содержание органического углерода (<0,1 %), ниже чем у «нижних песков» и значительно ниже, чем у ледового комплекса (3,5 %). Отмечается относительно высокое содержание водорослей (*Pediastrum* и *Botryococcus*, суммарно около 25 %), морские диатомеи, спикулы морских губок, жгутиковые.

Вблизи нижней границы толщи в скважине на берегу оз. Николай, на глубине установлены залежи пластового льда мощностью около 1 м (Королев, 1985). От нижней поверхности льда в подстилающие пески проникают тонкие, до 1 см, вертикально ориентированные ледяные жилы длиной 5–10 см. Аналогичные льды установлены и на других участках выхода «верхних песков».

Нижняя толща («нижние пески») сложена серыми тонкозернистыми горизонтально-слоистыми песками, редко среднезернистыми и крупнозернистыми, с намытыми растительными остатками. С.Ю. Королев отметил ожелезнение. В этой толще, в отличие от верхней, встречаются горизонтальные ледяные шлиры толщиной до 3 мм, указывающие на сингенетичное промерзание отложений.

Определение возраста верхних песков радиоуглеродным методом показало 12500 ± 60 ^{14}C лет (Schwamborn, 2004) под дном оз. Николай. На более высоких отметках, также вблизи оз. Николай, три образца были датированы около 13 тысяч лет и один образец – 12 тысяч лет. Определения возраста методами IR-OSL и ^{14}C из нижней части «верхних песков» показывают нарушения нормального хронологического ряда возрастных показателей по разрезу.

Толща «нижних» песков характеризуются упорядоченной последовательностью значений абсолютного возраста по данным определений в разрезе скважины Tur-2 методом ^{14}C (Schirrmeister et al., 2011) снизу-вверх по разрезу: >52110, 52130, 49960 лет.

Значения, близкие к вышеприведенным, установлены методом ^{14}C в толще песков, подстилающих ледовый комплекс (разрез Kur) (снизу-вверх): >52070, >57240, 50080 лет (Schirrmeister et al., 2011).

Между толщами «верхних» и «нижних» песков нами предполагается перерыв в осадконакоплении длительностью около 30 тысяч лет в интервале 49–18,5 тысяч лет (окончание каргинского – начало сартанского времени). Этот отрезок времени соответствует последнему ледниковому максимуму позднего неоплейстоцена, известному в литературе как LGM (Hubberten et al, 2004). К этому времени относится формирование ледового комплекса на пространстве приморских равнин востока Азии.

Выводы. В первой половине сартанского горизонта (24–18 тысяч лет назад) имели место следующие явления: в центральной части Арктического бассейна формирование ледникового покрова; на мелководном шельфе и приморских равнинах – формирование приледникового прогиба, выполненное отложениями ледового комплекса, проникновение отдельных ледниковых языков в область мелководного шельфа и приморских равнин.

Вторая половина сартанского горизонта (18–10 тысяч лет назад): в центральной части Арктического бассейна – разрушение ледникового покрова; на мелководном шельфе и приморских равнинах – действие катастрофического потока, размывающего ледовый комплекс, ледниковые языки и подстилающие нижние пески, формирование конусов выноса аналогичных конусу Арга («верхние пески») за счет переотложения осадков, подстилающих ледовый комплекс («нижние пески»).

Исследование выполнено при финансовой 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».

Литература

- Григорьев М.Н. Криоморфогенез устьевой области р. Лены. – Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1993. – 176 с.
- Королев С.Ю. Погребенные льды в песчаных отложениях западной части р. Лены // Региональные и инженерные геокриологические исследования. – Якутск, 1985. – С. 74–80.
- Hubberten H., Andreev A., Astakhov V.I. et al. The periglacial climate and environment in northern Eurasia during the Last Glaciation // Quaternary Science Reviews. No. 23. - 2004. - Pp. 1333–1357.
- Schwamborn J.G. Late Quaternary sedimentation history of the Lena delta // Berichte zur Polar- und Meeresforschung (Reports on Polar and Marine Research). Bremerhaven: Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Vol. 471. - 2004. - 102 p.
- Schirrmeister L., Grosse G., Schnell M. et al. Late Quaternary paleoenvironmental records from the western Lena Delta, Arctic Siberia // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol. 299. - 2011. - Pp. 175–196.

100-МЕТРОВАЯ ТОЛЩА МЕРЗЛЫХ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЛЕНО-АМГИНСКОМ МЕЖДУРЕЧЬЕ: ВОПРОСЫ СТРАТИГРАФИИ И КРИОЛИТОЛОГИИ

В.В. Спектор*, В.Б. Спектор, Н.Т. Бакулина, А.А. Куть, Н.В. Торговкин
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия
*vvspektor@mpi.yasn.ru

Аннотация. В результате проведенного исследования получен единый разрез четвертичных отложений Лено-Амгинской равнины, расположенной в перигляциальной области Средней Сибири. Этот покров имеет мощность около 100 м и представлен водными отложениями неоплейстоцена. На основе климатостратиграфического подхода установлены все три звена неоплейстоцена и все горизонты региональной стратиграфической шкалы, кроме казанцевского. На казанцевский горизонт приходится перерыв в осадконакоплении. Выделенные дробные климатостратиграфические единицы характеризуются высокой степенью корреляции с подразделениями стратиграфической шкалы неоплейстоцена Северной Евразии. Новый разрез неоплейстоцена существенно меняет представления о возрасте и эволюции рельефа Лено-Амгинской равнины.

Ключевые слова: климатостратиграфия, неоплейстоцен, Центральная Якутия.

100-METER COLUMN OF FROZEN QUATERNARY DEPOSITS IN THE LENA-AMGA RIVERS INTERFLUVE: ISSUES OF STRATIGRAPHY AND CRYOLITHOLOGY

V. V. Spektor*, V. B. Spektor, N. T. Bakulina, A. A. Kut, N. V. Torgovkin
Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
*vvspektor@mpi.yasn.ru

Abstract. The accomplished investigation resulted in a unified section of Quaternary deposits in the Lena-Amga Rivers plain, located in a periglacial area of Eastern Siberia. This cover about 100 m in thickness represents aqueous deposits of Neo-Pleistocene. Based on climate-stratigraphic approach, all three sub-epochs of Neo-Pleistocene and all horizons of the Regional stratigraphic scale with the exception of Kazantsevo horizon were established. The Kazantsevo horizon represents a stratigraphic gap. The identified climate-stratigraphic units correlate well with the units of Northern Eurasia Stratigraphic scale. The new section of Neo-Pleistocene changes significantly a concept of age and evolution of relief in the Lena-Amga Rivers plain.

Keywords: climate-stratigraphy, neo-pleistocene, Central Yakutia.

Лено-Амгинская равнина относится к ключевым районам перигляциальной области Средней Сибири. В ее пределах развит мощный (до 130 м) (Иванов, 1984) покров четвертичных отложений, состав, возраст и генезис которого, в значительной степени, остается слабоизученным. Основной объем предшествующих стратиграфических исследований был сосредоточен на опорных обнажениях рр. Алдана и Лены, в которых четвертичный покров представлен фрагментарно (Агаджанян, 1973, Гриненко и др., 1995; XIV Тихоокеанский..., 1979; Камалетдинов и др., 1982; Катасонов, 1973; Русанов, 1968 и др.).

В ходе полевых исследований 2018 г. нами было проведено бурение скважины на Абалахской поверхности Лено-Амгинской равнины (абс. отм. 215 м, координаты: 62,659 °с.ш., 131,386 °в.д.) с полным отбором и описанием керна. Скважиной пройден полный разрез четвертичных отложений. Отбор мерзлого керна был произведен до глубины 94,5 м. Изученный разрез представлен толщей мерзлых суглинков, алевроитов, в нижней части – песками и галечниками (Спектор и др., 2020; Куть и др., 2022). В верхней части толщи установлены тела повторно-жильных льдов. Породы, подстилающие вскрытую толщу

четвертичных отложений, относятся к полускальным, уплотненным, вероятно, мезозойским. Изученный разрез, в отличие от фрагментарных выходов в естественных обнажениях, представляет собой наиболее полную последовательность четвертичных отложений мощностью около 100 м. Полученные данные позволяют уточнить существующую стратиграфическую схему, определить генезис осадков и развить представления об эволюции криолитозоны рассматриваемого района.

Для стратиграфического расчленения и корреляции разреза был применен климатостратиграфический метод (Молодьков, Болиховская, 2011). Стратиграфическая корреляция выполнена в соответствии с Общей стратиграфической шкалой Лено-Вилуйского района перигляциальной области Средней Сибири (Унифицированная..., 2010).

Палинологические исследования, определения абсолютного возраста отложений методом OSL и проведенные корреляции позволяют утверждать, что вся рассматриваемая толща относится к неоплейстоцену. В изученном разрезе на основании климатостратиграфических реконструкций выделены голоцен, все три звена неоплейстоцена и горизонты верхнего и среднего звена. В раннем плейстоцене горизонты стратиграфической шкалы выделены предположительно. Подгоризонты стратиграфической шкалы выделены только в сартанском горизонте верхнего неоплейстоцена. Более детальное климатостратиграфическое расчленение, до ранга стадиялов/межстадиялов проведено для сартанского климатолита. В исследуемом разрезе представлены два периода (стадиала) голоцена: современный (субатлантический термостадиал) и пребореальный (термостадиал). Отложения голоцена относятся к верхней части пачки сезонного протаивания (интервал 0–0,48 м). К неоплейстоцену (разделу) относится вся нижележащая часть вскрытого разреза в интервале 0,48–94,5 м. В этой части разреза выделяются все три звена неоплейстоцена, охватывающие возрастной диапазон от 17 до 781 т.л.н. (Унифицированная..., 2010).

Верхнее звено в рассматриваемом разрезе занимает интервал 0,48–40,5 м и представлено тремя из четырех ступеней. Четвертая – вторая ступени, соответствующие сартанскому (0,48–15,5 м), каргинскому (15,5–31,5 м) и зырянскому (31,5–40,5 м) горизонтам, образуют непрерывный разрез. Отложения представлены ледовым комплексом и озерными фациями. Первая ступень, выделяемая как казанцевский горизонт, в представляемом разрезе не установлена и соответствует, вероятно, перерыву в осадконакоплении.

Непосредственно ниже перерыва в пачке озерных отложений залегают слои среднего неоплейстоцена (интервал 40,50–80,1 м). Среднее звено подразделяется на четыре региональных горизонта (сверху вниз): тазовский (40,5–46,9 м), ширтинский (46,9–49,9 м), самаровский (49,9–63,45 м) и тобольский (71,7–80,1 м), соответствующих продолжительным

полуритмам (климатолитам) интенсивного похолодания и потепления. Отложения представлены озерными и озерно-аллювиальными фациями.

Отложения нижнего звена неоплейстоцена (интервал 80,1–94,5 м) отнесены нами к лебедскому горизонту. Подошва горизонта в представляемом разрезе не определена. Все вскрытые отложения горизонта относятся к аллювиальным фациям.

Полученная стратиграфическая характеристика Лено-Амгинской равнины показывает, что в течение неоплейстоцена на этой территории происходило с перерывами осадконакопление констративного типа, которое завершилось на рубеже позднеледниковья и голоцена. В течение неоплейстоцена с короткими перерывами, эта территория представляла собой аккумулятивную равнину. Водное происхождение осадков доказывается присутствием многочисленных остатков водных растений, остатками фауны моллюсков, особенностями текстуры и состава осадков. Следовательно, поверхность равнины имеет раннеголоценовый возраст.

Анализ разреза позволяет видеть, что границы выделенных стратиграфических подразделений не совпадают с литологическими границами. В то же время, достаточно отчетливо обнаруживается, что скорость осадконакопления существенно менялась в зависимости от климатических условий. Она возрастала в течение криохронов и падала в течение термохронов. С наиболее теплыми эпохами (казанцевское время) связаны перерывы в осадконакоплении. В течение неоплейстоцена перигляциальная зона, прилегающая к области Верхоянского полупокровного оледенения, почти непрерывно погружалась. В наиболее теплые эпохи погружение в перигляциальной зоне сменялось поднятиями.

Исследование выполнено при финансовой 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».

Литература

Агаджанян, А. К., Боярская, Т. Д., Глушанкова, Н. И. и др. Разрез новейших отложений Мамонтова гора / А. К. Агаджанян [и др.]; под ред. К. К. Маркова. – Москва: МГУ, 1973. – 199 с.

Гриненко, В. С., Камалетдинов, В. А., Сластенов, Ю. Л., Щербаков, О. И. Геологическое строение большого Якутска / В. С. Гриненко [и др.] // Региональная геология Якутия. – Якутск: Изд-во Якутского гос. ун-та, 1995. – С. 3–20.

Иванов, М. С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины / М. С. Иванов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 126 с.

Камалетдинов, В. А. Рельеф цоколя и строение четвертичного покрова Лено-Амгинского междуречья / В. А. Камалетдинов // Геология кайнозоя Якутии. – Якутск: Изд-во Якутского филиала СО АН СССР, 1982. – С.94–103.

Катасонов, Е. М., Иванов, М. С. Криолитология Центральной Якутии. Путеводитель к экскурсии по Лене и Алдану / Е. М. Катасонов, М. С. Иванов // II Междунар. конф. по мерзлотоведению. – Якутск, 1973. – 37 с.

Куть, А. А., Спектор, В. В., Воронко, Б., Цзинь, Х. Микроморфологические исследования перигляциальных отложений Абалахской аккумулятивной поверхности (Центральная Якутия) / А. А. Куть [и др.] // География и природные ресурсы. – 2022. – № 2. – С. 114–122.

Молодьков, А. Н., Болиховская, Н. С. Климато-хроностратиграфическая схема неоплейстоцена Северной Евразии / А. Н. Молодьков, Н. С. Болиховская // Проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена. Вып.3. – М.: Географический факультет МГУ, 2011. – С.44–77.

Русанов, Б. С. Биостратиграфия кайнозойских отложений Южной Якутии / Б. С. Русанов. – М.: Наука, 1968. – 459 с.

Спектор, В. В., Јin, Н., Торговкин, Н. В., Максимов, Г. Т., Спектор, В. Б., Сыромятников, И. И. Строение плейстоценовых криогенных отложений Лено-Амгинской равнины (Центральная Якутия) / В. В. Спектор [и др.] // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 49–62.

Унифицированная региональная стратиграфическая схема четвертичных отложений Средней Сибири (Таймыр, Сибирская платформа) : объяснительная записка, с прил. / Под ред. Волкова В. С. и др. – Новосибирск : СНИИГГиМС, 2010. – 90 с.

XIV Тихоокеанский геологический конгресс. Неогеновые и плейстоценовые отложения Центральной Якутии. Путеводитель XIII тура. Якутск, 12–18 августа 1979 г. / Под ред. П. А. Соловьева. – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1979. – 74 с.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КРИОЛИТОЗОНЫ

**М.С. Судакова^{1,4}, А.В. Брушков¹, С.А. Великин², М.Л. Владов¹, Ю.Д. Зыков¹,
В.В. Неклюдов², В.В. Оленченко³, П.Ю. Пушкарев¹, М.Р. Садуртдинов^{4*},
А.Г. Скворцов⁴, А.М. Царев⁴**

1 – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

2 – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

*3 – Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия*

4 – Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия,

**mr_sadurtdinov@mail.ru*

Аннотация. Обоснована необходимость использования геофизических методов при геокриологическом мониторинге для изучения условий залегания многолетнемерзлых пород, поиска таликов и криопеггов, определения физико-механических свойств мерзлых пород. Показаны недостатки и достоинства этих методов, а также приведены примеры их использования для решения геокриологических задач под воздействием естественных и техногенных условий.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, геокриологический мониторинг, геофизические методы, сейсморазведка, электроразведка, георадиолокация.

GEOPHYSICAL MONITORING OF PERMAFROST

**M. S. Sudakova^{1,5}, A. V. Brushkov¹, S. A. Velikin², M. L. Vladov¹,
Y. D. Zikov¹, V. V. Nekljudov², V. V. Olenchenko³, P. Yu. Pushkarev¹,
M. R. Sadurtdinov^{4*}, A. G. Skvortsov⁴, A. M. Tsarev⁴**

1 – Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

2 – Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

3 – Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

4 – Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia

**mr_sadurtdinov@mail.ru*

Abstract. The paper substantiates the need to use geophysical methods in geocryological monitoring to study the conditions of permafrost, search for taliks and cryopegs, and determine the physical and mechanical properties of frozen grounds. Their advantages, disadvantages and examples of their use for solving geocryological problems are shown in natural and technogenic conditions.

Keywords: permafrost, geocryological monitoring, geophysical methods, seismic exploration, electrical exploration.

Только для Арктической зоны РФ предполагаемый ущерб экономике может быть оценен к 2050 г. в 5–7 трл рублей (Мельников и др., 2021). Обеспечить устойчивость

инфраструктуры сможет система геокриологического мониторинга. Наблюдения необходимо проводить не только за температурой грунтов, но и за другими параметрами, необходимыми для прогноза развития опасных природных процессов. Необходимо отметить, что не всегда по температурным данным можно определить состояние пород (мерзлое/талое). Геофизические методы позволяют ответить на этот вопрос. Они обеспечивают получение информации о физических, физико-механических характеристиках среды, включая деформационные и прочностные, которые необходимы для расчета оснований сооружений. Геофизический мониторинг, таким образом, позволяет оценить изменение несущей способности мерзлых пород.

При переходе горных пород из талого состояния в мерзлое происходит не только фазовый переход воды, но и качественное преобразование их состава, строения и свойств (Ершов, 2002). При этом существенно меняются и геофизические свойства (Воронков, Фролов, 1992, Джурик, 1982; Зыков, 2007, Омеляненко, 2001; Садуртдинов и др., 2016; Судакова, Владов, 2020; Фролов, 1998 и др.).

Целью мониторинга вечной мерзлоты (или мониторинга криолитозоны) является оценка ее строения и состояния под воздействием естественных и техногенных условий. Задачами геокриологических исследований, в том числе геофизического мониторинга, особенно в условиях техногенного воздействия, являются: определение положения кровли ММП; изучение строения толщи ММП с выделением подземных льдов, таликов и криопэггов, областей газовых скоплений, зон фильтрации и др.; оценка физико-механических свойств ММП и их изменения; мониторинг и прогноз склоновых (морские и речные береговые склоны, борта карьеров) и иных процессов, приводящих к нарушению грунтового массива.

Пример геофизического мониторинга криолитозоны одним из методов приведен на рис. 1. Слева видна «геоэлектрическая» деградация высокоомной (мерзлой) приповерхностной линзы (красным) в районе скв. ГФС–1 и, аналогично, развитие низкоомной линзы (русло обходной фильтрации подземных вод) в районе скв. 78.

Температурный разрез скв. 78 (рис.1, справа) показывает развитие талика с 2010 по 2015 г. в диапазоне глубин 230–250 м. Для сравнения, данный горизонт выделен белым квадратом в скв. 78 на геоэлектрическом разрезе от 2014 г., и черным квадратом – на температурном разрезе за эту же дату. Как видно на рис.1, мощности талика и низкоомной линзы совпадают (аналогично и для остальных лет), что подтверждает данные геоэлектрического мониторинга результатами температурных наблюдений.

Мониторинг состояния вечной мерзлоты важен не только в естественных природных условиях (фоновый мониторинг), но и для обеспечения устойчивости жилых и

промышленных зданий и инженерных сооружений, в том числе инфраструктуры нефтегазовых промыслов в криолитозоне, в составе геотехнического мониторинга (ГТС).

Результаты мониторинговых геофизических исследований в различных мерзлотных условиях показывают, что геофизические методы способны успешно решать задачи мониторинга криолитозоны, в том числе на территориях, подвергающихся антропогенному воздействию. Представленные результаты демонстрируют высокую эффективность геофизического мониторинга в криолитозоне. Особенно актуально использование геофизического мониторинга на застроенных и нарушенных территориях, которые характеризуются контрастной пространственно-временной изменчивостью мерзлотных условий, достоверно оценить которую с помощью температурных наблюдений невозможно.

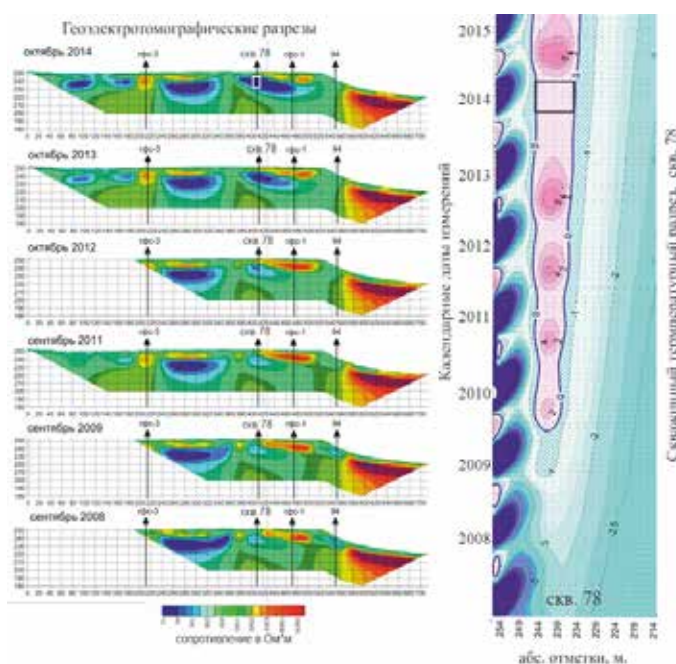


Рисунок 1. Геоэлектрические разрезы и фрагмент температурного разреза за 2008–2014 гг. при мониторинге состояния береговых примыканий плотины Вилюйской ГЭС.

Литература

- Воронков, О. К., Фролов, А. Д. Физические свойства пород при отрицательных температурах / О. К. Воронков, А. Д. Фролов // Петрофизика. – Т. 3. – М. : Недра, 1992. – С. 43–65.
- Джурик, В. И. Прогноз изменения упругих параметров песков при переходе из мерзлого состояния в талое // В. И. Джурик // Геология и геофизика. – № 7. – Новосибирск, 1982. – С.87–95.
- Ершов, Э. Д. Общая геокриология / Э. Д. Ершов. – М. : Изд-во МГУ, 2002. – 682 с.
- Зыков, Ю. Д. Геофизические методы исследования криолитозоны / Ю. Д. Зыков. – Москва : МГУ, 2007.
- Мельников, В. П., Осипов, В. И., Брушков, А. В. Бадина, С. В., Дроздов, Д. С., Дубровин, В. А., Железняк, М. Н., Садуртдинов, М. Р., Сергеев, Д. О., Окунев, С. Н., Остарков, Н. А., Осокин, А. Б., Федоров, Р. Ю. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов / В. П. Мельников [и др.] // Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25, № 6. – С. 3–15. DOI 10.15372/KZ20210601.
- Омельяненко, А. В. Научно-методические основы георадиолокации мерзлых горных пород : дисс. доктора техн. наук. / Омельяненко А. В. – Якутск, 2001. – 359 с.
- Садуртдинов, М. Р., Малкова, Г. В., Скворцов, А. Г., Судакова, М. С., Царев, А. М. Современное состояние островной мерзлоты в пойме реки Печора (Ненецкий автономный округ) по результатам комплексных геокриологических и геофизических исследований / М. Р. Садуртдинов [и др.] // Геофизические исследования в

криолитозоне при строительстве : материалы Пятой конференции геокриологов России. МГУ имени М. В. Ломоносова, 14–17 июня 2016 г. – Т. 1, ч. 4. – М. : «Университетская книга», 2016. – С. 340–345.

Судакова, М. С., Владов, М. Л. Результаты экспериментального исследования акустических свойств водонасыщенного песка в интервале температуры от –20 до +20 °С. / М. С. Судакова, М. Л. Владов // Вестник Московского университета. – Ч. 2. Серия 4 : Геология. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2020. – № 2. – С. 89–98.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ВОСТОЧНОЙ ЯКУТИИ

Р.Г. Сысолятин^{*}, С.И. Сериков

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

** robertseesaw@gmail.com*

Аннотация. Малонаселенная территория Восточной Якутии в геокриологическом отношении характеризуется лишь единичными и эпизодическими исследованиями. Для понимания современных условий и оценки траектории будущих изменений природной среды, здесь с 2010 г. проводится мониторинг температурного режима в различных ландшафтах на высоте от 800 до 1821 м. Результаты исследований показывают смешанную реакцию температур мерзлых пород. В 2022 г. выполнено бурение и оборудование пяти 30-м наблюдательных скважин вблизи метеостанции. Впервые проводится мониторинг по единой методике в слое годовых теплооборотов как в высокогорных областях Верхоянского хребта – м/с Восточная (1290 м), так и на полюсе холода в Оймяконе. Мониторинговые скважины могут являться опорными пунктами для масштабирования геокриологических исследований. Информация о температурном режиме горных пород позволяет провести оценку инженерно-геологических условий (1), мощности мерзлой толщи (2), определить влияние текущих и будущих климатических изменений на состояние криолитозоны (3).

Ключевые слова: Восточная Якутия, температурный режим, мониторинг криолитозоны, полюс холода.

PERMAFROST TEMPERATURE REGIME IN EASTERN YAKUTIA

R.G. Sysolyatin^{1*}, S.I. Serikov¹

Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia

** robertseesaw@gmail.com*

Abstract. The unhabitated territory of Eastern Yakutia is frontier permafrost study region. To understand modern conditions and expect the trajectory of future changes in the natural environment, monitoring of the temperature regime of permafrost in different landscapes has been carried out here since 2010. The results show a various response of permafrost temperature. In 2022, drilling and equipping of five 30-m monitoring boreholes near the weather station was carried out. For the first time monitoring using a unified methodology in the layer of zero annual amplitude in the high altitude areas of the Verkhoyansk Range - w/s Vostochnaya (1290 m) and at the "Pole of Cold" Oymyakon. Monitoring boreholes can be the key points for scaling geocryological studies. Data about the temperature regime of permafrost makes it possible to assess engineering conditions (1), permafrost thickness (2), and to determine the impact of current and future climatic changes to permafrost (3).

Keywords: Eastern Yakutia, temperature regime, permafrost monitoring, Pole of Cold.

Для регионов развития криолитозоны связь роста температур приземного воздуха и деградация многолетнемерзлых пород (ММП) очевидна. Потеря сельскохозяйственных угодий, разрушение зданий и сооружений, удорожание содержания инфраструктуры, изменение режима поверхностных и подземных вод – лишь неполный список негативных последствий изменений геокриологических условий. Различные авторы указывают на бóльшую опасность проявления негативных последствий именно в горных областях, где ММП более уязвимы к климатическим изменениям (*Haerberli et al., 2010*). Потери в денежном эквиваленте при пессимистичном сценарии развития ситуации с изменением климата оцениваются для России в сумму более 9 трлн рублей к 2050 году.

Территория Восточной Якутии во многом остается «белым пятном» как в плане изученности геокриологических условий, так и в отношении оценки современной динамики состояния ММП. Температура мерзлых пород и характеристика параметров глубокого промерзания относится к обобщающим работам 1970-х годов (Балобаев и Левченко, 1978; Некрасов, 1976). Для актуализации данных о ММП, с 2010 года проводится работа по созданию сети мониторинга температурного режима в Восточной Якутии (рис. 1).

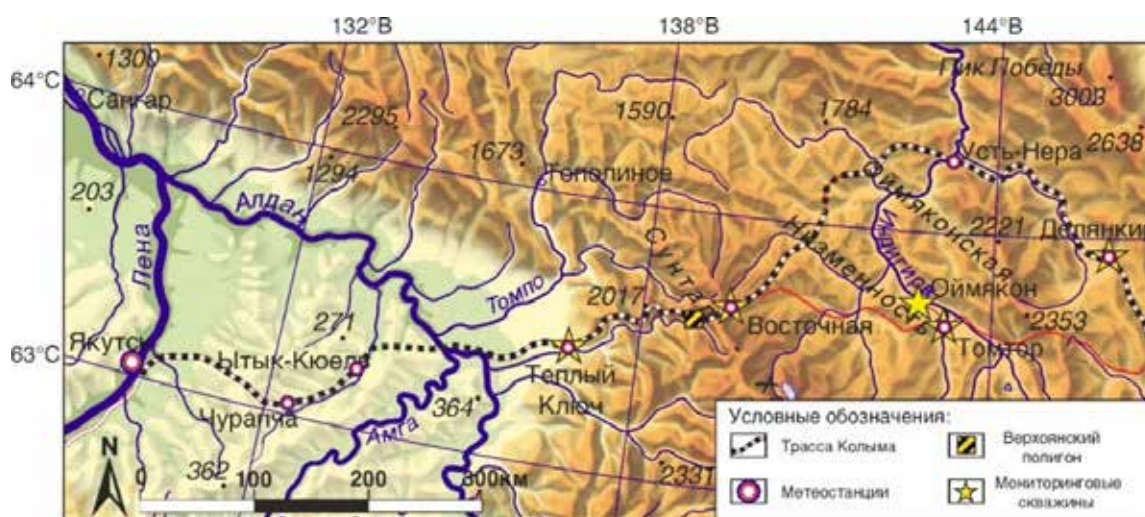


Рисунок 1. Схема территории проведения исследований (Центральная Якутия и Верхоянский хребет) с расположением метеостанций и мониторинговых скважин.

Первым этапом реализации стал Верхоянский полигон, где проводится мониторинг температур воздуха, поверхности и горных пород до глубины 15 м в различных ландшафтных условиях на высоте от 800 до 1821 м. В ходе проведения наблюдений установлено: среднегодовая температура воздуха (T_v) между участками в течение одного сезона варьирует от $-10,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ с ярко выраженным инверсионным распределением; температура поверхности (T_n) может опускаться до $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ на участках, не благоприятствующих снегонакоплению; средняя годовая температура пород на глубине 1 м ($T_{1м}$) изменяется от $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ для пойменных ландшафтов до $-10,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в крупнообломочных коллювиальных отложениях (Sysolyatin et al., 2020). Значимых трендов к повышению температур для T_v , T_n , $T_{1м}$ не установлено. В ходе анализа материалов режимных наблюдений для большинства участков характерны близкие значения среднегодовых температур поверхности и на глубине до 15 м. Используя установленную для региона зависимость перераспределения теплового потока и основываясь на данных об установленном температурном режиме поверхности и мерзлых пород, была рассчитана мощность мерзлой толщи для участка работ (табл. 1).

Расчётная мощность мерзлой толщи для участка исследований на допущении квазистационарного распределения температур с глубиной и изменении температур горных пород с высотой

Высота, м	Угол наклона, град (α)	Температура на глубине 20 м, °С	q , Вт/м ²	Мощность мерзлой толщи, м
1550	24,2	-5,5	47	298
1600	26,6	-5,7	47	314
1700	31,0	-6,0	45	343
1800	35,0	-6,5	43	386
1900	38,7	-7,0	41	434
2000	42,0	-7,5	39	486

Для характеристики и прогноза состояния ММП требуется учёт ряда факторов. Наиболее значимые из них – климатические параметры, температурный режим, строение массива пород. В связи с этим, с 2021 г. на 4 метеостанциях региона были пробурены и оборудованы 4 скважины глубиной до 30 м (рис. 1). Также скважина была установлена в пос. Оймякон для характеристики ММП в экстремально суровых климатических условиях. В ходе работ удалось установить состав отложений, влажность (льדיстость), механические и теплофизические параметры. Первичные замеры температур приведены на рис. 2, в. По имеющемуся годовому циклу наблюдений для м/с «Восточная» установлено наличие низкотемпературных ММП с температурой на подошве слоя годовых теплооборотов ниже $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, сезонное оттаивание достаточно велико – до 2,5 м, средняя температура поверхности за 2021 г. $-6,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, в течение года опускалась до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2, а). Характеристика таликовой зоны, типичной для данного региона, проведена в пойме р. Восточная Хандыга (рис. 2, б). Сезонное промерзание способно достигать глубины 5,7 м, а температура пород на глубине 6,7 м в течение года поднимается выше $6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

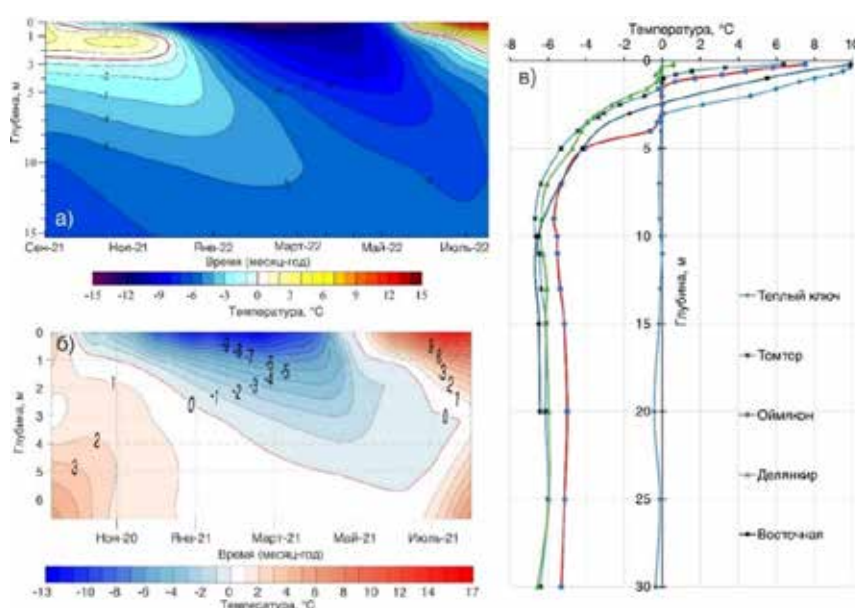


Рисунок 2. Температурный режим многолетнемерзлых (а) и сезонно мерзлых (б) пород. (в) – температура горных пород на середину августа 2022 г.

Литература

- Балобаев В.Т., Левченко А.И. Геотермические особенности и мерзлая зона хребта Сунтар-Хаята. Геотеплофизические исследования в Сибири. – Н.: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. – С. 129–142.
- Некрасов И.А. Криолитозона Северо-Востока и Юга Сибири и закономерности её развития. – Якутск: Кн. изд-во, 1976. – 248 с.
- Haeberli W, Noetzi J, Arenson L, Delaloye R, Gaertner-Roer I, Gruber S, Isaksen K, Kneisel C, Krautblatter M, Phillips M. 2010. Mountain permafrost: development and challenges of a young research field. *Journal of Glaciology* 57 (200): 1043–1058.
- Sysolyatin R., Serikov S., Zheleznyak M. et al. Temperature monitoring from 2012 to 2019 in central part of Suntar-Khayat Ridge, Russia. *Journal of Mountain Science* 17, 2321–2338 (2020).

ЛЕДОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДОЛИНЫ Р. ИНДИГИРКИ И ИХ СОСТОЯНИЕ

В. Е. Тумской^{*}, Т. В. Романис

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

** vtumskoy@gmail.com*

Аннотация. На территории Абыйской низменности изучены разрезы едомного ледового комплекса и подстилающих его отложений. Установлено присутствие в разрезе более древнего, чем едомный, ледового комплекса. Их разделяет горизонт, представленный протяженными линзами озерных отложений и маломощными пачками пролювиально-делювиальных отложений. В основании озерных отложений описаны специфические узкие вертикальные псевдоморфозы по повторно-жильным льдам, заполненные остатками древесной растительности. В пачках перемива концентрируются переотложенные из более древнего ледового комплекса остатки мамонтовой фауны. Представлена предварительная корреляция выделенных двух горизонтов ледового комплекса со свитами, выделенными ранее в низовьях р. Индигирки и на побережье пролива Дмитрия Лаптева. Опыт работ показал, что многочисленные штольни, в которых моют и добывают кости, с одной стороны, предоставляют уникальную возможность изучения строения отложений «в объеме», а с другой – со временем могут провоцировать провальные образования на поверхности и интенсивное разрушение едомных массивов.

Ключевые слова: ледовый комплекс, Индигирка, современное состояние.

ICE COMPLEXES OF THE INDIGIRKA RIVER VALLEY AND THEIR CONDITION

V. E. Tumskoy^{*}, T. V. Romanis

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

** vtumskoy@gmail.com*

Abstract. On the territory of the Abyi lowland, sections of the yedoma ice complex and its underlying deposits were studied. The presence in the section of an ice complex older than the yedoma has been established. They are separated by a horizon represented by extended lenses of lacustrine deposits and thin unit of proluvial-deluvial deposits. At the base of lacustrine sediments, specific narrow vertical ice wedge pseudomorphs, filled with remains of woody vegetation, are described. Remains of the mammoth fauna redeposited from the older ice complex are concentrated in the proluvial-deluvial unit. A preliminary correlation of the identified two horizons of the ice complex with the suites identified earlier in the lower reaches of the Indigirka River and on the coast of the Dmitry Laptev Strait is presented. Work experience has shown that numerous adits, in which bones are washed and mined, on the one hand, provide a unique opportunity to study the 3D-structure of deposits, and on the other hand, over time, they can provoke sinkhole formations on the surface and intensive destruction of yedoma hills.

Keywords: ice complex, Indigirka, modern condition.

Отложения ледового комплекса криолитологически представляют собой высокольдистые синкриогенные неоплейстоценовые отложения с повторно-жильными льдами. Они широко распространены на территории Якутии, в том числе и в бассейне р. Индигирки в пределах Абыйской и Яно-Индигирской низменностей. Здесь они формируют выраженные в рельефе едомные возвышенности относительной высотой 40–60 м, ограниченные голоценовыми террасами или аласами. Изучение отложений ледового

комплекса в долине Индигирки началось в середине XX в/ (*Бискэ, 1960; Лаврушин, 1963*) и продолжалось до 80-х годов (*Каплина и др., 1980; Втюрин и др., 1984*). В низовьях р. Индигирки, в разрезах на протоке Аччыгый-Аллаиха, были изучены отложения едомного ледового комплекса мощностью до 25 м. В разрезах также были исследованы отложения, подстилающие едомный ледовый комплекс, отнесенные Ю. А. Лаврушиным к аллаиховской и аччыгыйской свитам. Т. Н. Каплиной (*Каплина и др., 1980*) в аллаиховской свите были описаны линзы алевритов с сингенетическими ледяными жилами, которые наблюдались также В. Е. Тумским в 2011 г. Криолитологически они в полной мере соответствовали отложениям типа ледового комплекса, только не едомного, а более древнего. Это позволяет говорить о присутствии здесь в разрезе двух криоформаций (*Тумской, 2021*) ледового комплекса – едомного и аллаиховского. Отложения, подстилающие и вмещающие линзы аллаиховского ледового комплекса, имеют иной облик, существенно меньшую льдистость и преимущественно массивные криогенные текстуры. От перекрывающих отложений едомного ледового комплекса они стратиграфически отделяются линзами озерно-болотных отложений аччыгыйской свиты, имеющими мощность не более 10 м. Т. Н. Каплина также отмечает, что в основании отложений едомного ледового комплекса местами отмечаются следы эрозионного размыва.

В ходе работ 2022 г. авторы изучили несколько обнажений в пределах Абыйской низменности. В одном из них, расположенном на правом берегу р. Индигирки в 30 км выше пос. Куберганя, вскрывается толща озерных отложений, представленных суглинками с сетчатой криогенной текстурой. В их основании присутствуют узкие вертикальные псевдоморфозы (высотой около 3 м) по повторно-жильным льдам, заполненные остатками древесной растительности. Сверху озерная толща перекрывается отложениями едомного ледового комплекса. В 41 км ниже по течению от пос. Белая Гора в известном обнажении Малыхчын также удалось установить строение отложений, залегающих ниже едомного ледового комплекса мощностью около 40 м. Этому способствовали также многочисленные искусственные штольни, в которых идет добыча мамонтовой кости. Было установлено, что до высоты 13–14 м здесь залегают относительно малольдистые алевриты с массивными криогенными текстурами, содержащие в верхних 3–4 м сингенетические повторно-жильные льды и, по-видимому, сегрегационные ледогрунтовые образования. Между ледяными жилами криогенные текстуры обычно были представлены поясковидными и поясковыми криогенными текстурами. Криолитологически эти части алевритовой толщи могут рассматриваться как ледовый комплекс. На многих участках, как показывает обследование обнажений и штолен, отложения этого ледового комплекса подверглись эрозионному размыву. В результате был сформирован горизонт общей мощностью до 5 м,

представленный серией эрозионных вложений мощностью 1–2 м. В нем концентрируются переотложенные и перемытые палеонтологические остатки, значительное количество кустарников и торфяного материала. Озерных отложений, которые могли бы возникнуть в результате процесса термокаста по этому ледовому комплексу, не обнаружено, хотя они могут присутствовать в других местах.

Таким образом, в долине р. Индигирки, в пределах Абыйской и Яно-Индигирской низменностей, вскрываются разрезы отложений, имеющих принципиально сходное строение. В основании их видимой части залегают малоледистые отложения, в низовьях Индигирки относимые к отложениям аллаиховской свиты. В районе пролива Дмитрия Лаптева, аналогичные малоледистые отложения известны как куччугуйская свита керемеситского надгоризонта среднего неоплейстоцена (*Тумской, 2012*). К кровле малоледистых отложений местами приурочены линзы отложений, криолитологически являющиеся ледовым комплексом. На Индигирке они не рассматриваются как отдельный горизонт (авторами он назван аллаиховским ледовым комплексом), а в береговых разрезах пролива Дмитрия Лаптева их аналогом, вероятно, является ледовый комплекс быччыгыйской свиты (*Тумской, 2012*). В результате размыва и/или частичного протаивания отложений этого ледового комплекса и подстилающих их отложений образовались озерные отложения аччыгыйской свиты (ее аналог – крест-юряхские озерные отложения) и пролювиально-делювиальные отложения. Наиболее вероятное время этих природных перестроек – первое потепление позднего неоплейстоцена. Далее на протяжении большей части позднего неоплейстоцена в суровых климатических условиях накапливались отложения едомного ледового комплекса.

В настоящее время особый интерес представляют отложения перемыва, формировавшиеся во время первого термохрона позднего неоплейстоцена. Судя по всему, эрозионная переработка привела к полному или частичному уничтожению аллаиховского ледового комплекса и вторичной концентрации палеонтологического материала из него в довольно маломощной толще перемыва. Именно она в настоящее время служит основным «продуктивным горизонтом» при добыче мамонтовой фауны в пределах Абыйской низменности. Многочисленные штольни, протягивающиеся на сотни метров и образующие разветвленную сеть в толще мерзлых пород, часто подходят вплотную к современной дневной поверхности, а мерзлые породы вблизи их устьев интенсивно протаивают. Со временем это может провоцировать образование провальных форм на поверхности едом, а разрушение входов в штольни – к интенсивному расчленению едом со стороны склонов.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №22-17-00176.

Литература

- Бискэ, С. Ф. Четвертичные отложения озерно-аллювиальной равнины в низовьях р. Индигирки / С. Ф. Бискэ. – Геология и геофизика. – 1960. – № 8. – С. 29–42.
- Втюрин, Б. И., Болиховская, Н. С., Болиховский, В. Ф., Гасанов, Ш. Ш. Воронцовский разрез едомных отложений в низовьях р. Индигирки / Б. И. Втюрин [и др.] // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – 1984. – № 53. – С. 12–21.
- Каплина, Т. Н., Шер, А. В., Гитерман, Р. Е., Зажигин, В. С., Кисилев, С. В., Ложкин, А. В., Никитин, В. П. Опорный разрез плейстоценовых отложений на р. Аллаихе (низовья Индигирки) / Т. Н. Каплина [и др.] // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – 1980. – № 50. – С. 73–95.
- Лаврушин, Ю. А. Аллювий равнинных рек субарктического пояса и перигляциальных областей материковых оледенений / Ю. А. Лаврушин // Тр. ГИН АН СССР, вып. 87. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 253 с.
- Тумской, В. Е. Особенности криолитогенеза отложений Северной Якутии в среднем неоплейстоцене – голоцене / В. Е. Тумской // Криосфера Земли. – 2012. – Т. XVI, № 1. – С. 12–21.
- Тумской, В. Е. Криостратиграфия и криофациальный анализ / В. Е. Тумской // Криосфера Земли. – 2021. – Т. XXV, № 4. – С. 3–16.

ЛИПИДЫ В ПОЧВАХ КРИОГЕННЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА

Э.О. Чимитдоржиева*, Г.Д. Чимитдоржиева

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

**erzhena_ch@mail.ru*

Аннотация. Определено содержание липидов в почвах бугров пучений (черноземы глеевые криотурбированные) и термокарстовых понижений (гумусово-квасиглеевые окарбонатенные почвы) криогенных форм рельефа. Выявлено, что доля липидов в составе органического вещества значительна и она определяет значительную роль в биохимических процессах, происходящих в почве, а также является важным резервуаром углерода.

Ключевые слова: липиды, углерод, бугры пучения, термокарстовые понижения, юг Витимского плоскогорья.

LIPIDS IN SOILS OF CRYOGENIC LANDFORMS

E.O. Chimitdorzhieva*, G.D. Chimitdorzhieva

Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russia

**erzhena_ch@mail.ru*

Abstract. The content of lipids in the soils of heaving mounds (cryoturbated gley chernozems) and thermokarst depressions (humus-quasi-gley carbonated soils) of cryogenic landforms was determined. It was revealed that the proportion of lipids in the composition of organic matter is significant and it determines a significant role in the biochemical processes occurring in the soil, and is also an important reservoir of carbon.

Keywords: lipids, carbon, heaving mounds, thermokarst depressions, south of the Vitim plateau.

Липиды – это обобщенный термин для обозначения ряда органических соединений, которые не обладают каким-либо одним химическим свойством. Липиды гибко реагируют на внешние изменения и обеспечивают энергией микроорганизмов в почве, поэтому их можно использовать для определения степени биохимических процессов, происходящих в почве. Липиды оказывают значительное влияние на доступность почвенной воды и питательных

веществ и часто используются в качестве маркеров для анализа структуры растительности или изучения трансформации и источника органического вещества почвы (*Feng et al., 2010*). В разных почвах могут наблюдаться различные концентрации липидов; эти уровни можно определить по органо-минеральным компонентам.

Органическое вещество, не являющееся специфическим для почв, может поступать в различном количестве, в зависимости от почвенного горизонта и типа почвы. Содержание липидов в минеральных горизонтах почвы колеблется от 2–14 % до 10–12 % от общего количества органического вещества, в то время как в органо-генных горизонтах и торфе оно может накапливаться до 15–20 % (*Орлов, 1992*). Серые лесные, каштановые и черноземы с высоким уровнем гумификации имеют минимальное количество липидов (2–4 %), но даже это небольшое количество все равно оказывает важное влияние на экологические функции, такие как сорбционные свойства почвенных частиц, скорость трансформации органического вещества и энергетические процессы, структура и функционирование микробного комплекса в пищевой сети (*Jansen, Wiesenberg, 2017*).

Целью работы было определить общее содержание липидов в черноземах глеевых криотурбированных и гумусово-квизиглеевых окарбонированных почв, оценить долю липидов в составе органического вещества.

Район исследований расположен в Еравнинской котловине юга Витимского плоскогорья, где многолетняя мерзлота достигает максимальной мощности 120–130 м, в среднем составляя 80–85 м. Верхняя граница мерзлоты залегает на глубине 1.5–3.0 м от дневной поверхности, а местами – на глубине менее 1 м.

Липидную фракцию извлекали азеотропной смесью спирта и бензола (*Орлов, Гришина, 1981*). Морфологическая и физико-химическая характеристика исследованных почв опубликована ранее (*Чимитдоржиева и др., 2019*).

Абсолютное содержание липидов в % к почве в исследуемых почвах бугров пучений в слое 0–30 см составляет от 0,14 до 0,79 %. Липидный профиль бугра пучения БЗ характеризуется меньшим накоплением липидов (0,14 – 0,094) по сравнению с бугром пучения Б1РЗ, где показатель выше (0,37–0,79 %). В почвах термокарстовых понижений содержание липидов варьирует от 0,43 до 2,53 %. Вниз по профилю отмечено снижение показателя.

Доля липидов в составе органического вещества органо-генных горизонтов термокарстовых понижений составляет 1,7–7 % от его общего содержания, в почвах бугров пучений показатель выше и составляет 5–11 %.

Таким образом, можно заключить, что доля липидов в составе органического вещества значительна и она определяет значительную роль в биохимических процессах, происходящих в почве, а также является важным резервуаром углерода.

Работа выполнена за счет средств бюджета по теме госзадания № 121030100228–4.

Литература

- Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. – Москва: Изд-во МГУ, 1981. – 271 с.
Орлов Д.С. Химия почв. – Издание 2-е, исправленное и дополненное. – Москва: Изд-во МГУ, 1992. – 400 с.
Чимитдоржиева Г.Д., Чимитдоржиева Э.О., Мильхеев Е.Ю., Цыбенков Ю.Б., Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Егорова Р.А., Солдатова З.А., Андреева Д.Б., Корсунова Ц.Д.-Ц., Давыдова Т.В. Почвы криогенных форм рельефа на юге Витимского плоскогорья: распространение и роль в распределении пулов почвенного углерода // Почвоведение. – 2019. – № 9. – С. 1029–1038.
Feng X., Xu Y., Jaffé R., Schlesinger W.H., Simpson M. Turnover rates of hydrolysable aliphatic lipids in Duke Forest soils determined by compound specific ¹³C isotopic analysis. *Org Geochem.* - Vol. 41. – 2010. - P. 573–579.
Jansen B., Wiesenberg G.L.B. Opportunities and limitations related to the application of plant-derived lipid molecular proxies in soil science // *Soil.* № 3. – 2017. - P. 211–234.

ЛИПИДНЫЙ ПРОФИЛЬ ХОЛОДНЫХ И МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ

Э.О. Чимитдоржиева*

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

**erzhena_ch@mail.ru*

Аннотация. Определено абсолютное содержание липидов в % к почве в холодных и мерзлотных почвах Западного Забайкалья. Распределение липидов по профилю почв убывающее. В серых лесных черноземах и каштановых почвах с высокой степенью гумификации органического вещества доля липидов минимальна, но даже это небольшое количество все равно оказывает важное влияние на экологические функции почв.

Ключевые слова: липиды, черноземы, серые лесные почвы, каштановые почвы, Забайкалье.

LIPID PROFILE OF COLD AND FROZEN SOILS

E.O. Chimitdorzhieva

Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russia

**erzhena_ch@mail.ru*

Abstract. The absolute content of lipids in % of soil in cold and permafrost soils of Western Transbaikalia was determined. The distribution of lipids along the soil profile is decreasing. In gray forest, chernozem and chestnut soils, with a high degree of humification of organic matter, the proportion of lipids is minimal. But even this small amount still has an important impact on the ecological functions of soils.

Keywords: lipids, chernozems, gray forest soils, chestnut soils, Transbaikalia.

Липидный профиль почвы в значительной степени представляет собой продукт процессов синтеза, полимеризации и разложения растительности, которые определяются почвенной средой. Липиды могут служить индикатором интенсивности биохимических процессов в почвах, они содержат физиологически активные компоненты.

В группу липидов включают все вещества, извлекаемые из почвы органическими растворителями. Таким образом, это аналитическая группа веществ, объединяемых по характеру растворимости, а не по типу строения.

Целью работы было определить липидный профиль холодных (серые лесные черноземы дисперсно-карбонатные, каштановые почвы) и мерзлотных почв (чернозем квазиглеевый) Западного Забайкалья.

Район исследований расположен на территории Республики Бурятия. Серые лесные почвы расположены в Кабанском районе (с. Дулан), черноземы дисперсно-карбонатные – в Мухоршибирском районе (с. Хонхолой), каштановые почвы – в Мухоршибирском районе (с. Тугнуй), чернозем квазиглеевый – в Еравнинском районе (с. Сосново-Озерское).

Липидную фракцию извлекали азеотропной смесью спирта и бензола (Орлов, Гришина, 1981). Физико-химическая характеристика исследованных почв опубликована ранее (Чимитдоржиева и др., 2011; Чимитдоржиева и др., 2016).

Абсолютное содержание липидов в % к почве в черноземе квазиглеевом имеет максимум в слое 10–20 см – 0,30 %, вниз по профилю его содержание снижается до 0,07–0,08 % (рисунок 1). Серые лесные почвы имеют относительно равномерное распределение липидов по профилю. В черноземе дисперсно-карбонатном и каштановых почвах максимум отмечен в слое 0–10 см и составляет 0,22 и 0,15 % соответственно.

Рисунок 1. Содержание липидов в холодных и мерзлотных почвах.

В серых лесных черноземах и каштановых почвах с высокой степенью гумификации органического вещества доля липидов минимальна. Таким образом, накопление липидов в гумусовых горизонтах зонального ряда почв находится в обратной зависимости от степени гумификации и содержания гуминовых кислот. Но даже это небольшое количество все равно оказывает важное влияние на экологические функции, такие как сорбционные свойства

почвенных частиц, скорость трансформации органического вещества и энергетические процессы, структура и функционирование микробного комплекса в пищевой сети.

Работа выполнена за счет средств бюджета по теме госзадания № 121030100228–4.

Литература

- Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. – Москва: Изд-во МГУ, 1981. – 271 с.
Орлов Д.С. Химия почв. – Издание 2-е, исправленное и дополненное. – Москва: Изд-во МГУ, 1992. – 400 с.
Чимитдоржиева Э.О., Чимитдоржиева Г.Д. Эмиссия диоксида углерода из постагрогенных степных и сухостепных почв Западного Забайкалья // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 2. – С. 93–102.
Tsybenov Y.V., Chimitdorzhieva G.D., Chimitdorzhieva E.O., Egorova R.A., Mil'kheev E.Y., Davydova T.V., Korsunova T.D.-T. Morphology and physical properties of soil material in cryogenic cracks of permafrost-affected meadow-chernozemic soils of the Transbaikalia // Eurasian Soil Science. – 2016. – Т. 49, № 8. – С. 908–914.

РОЛЬ СОЛЕПЕРЕНОСА В ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ ВНУТРИМЕРЗЛОТНЫХ ГАЗОГИДРАТОВ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е.М. Чувилін^{*}, В.В. Екимова

Сколковский институт наук и технологий, г. Москва, Россия

^{} e.chuvilin@skoltech.ru*

Аннотация. Одним из факторов, осложняющих освоение арктических территорий, является активная эмиссия метана из криолитозоны. Одной из возможных причин этой эмиссии является дестабилизация внутримерзлотных газогидратных образований, связанная с изменением термобарических и геохимических условий, в частности, в результате процессов солепереноса. При этом последний фактор остается слабоизученным, что требует его специального рассмотрения. Данная работа посвящена экспериментальному моделированию взаимодействия мерзлых гидратонасыщенных песчаных пород с солевыми растворами и оценки влияния различных факторов (давления, температуры, состава и концентрации солевого раствора) на процессы солепереноса и дестабилизацию газовых гидратов в мерзлых породах.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, криолитозона, газогидраты, миграция солей, влияние давления, поровый лед, диссоциация гидратов, самоконсервация, эмиссия метана, воздействие на окружающую среду.

THE ROLE OF SALT TRANSFER IN THE DESTABILIZATION OF INTERMAFROST GAS HYDRATES: RESULTS OF EXPERIMENTAL MODELING

E.M. Chuvilin^{*}, V.V. Ekimova

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

^{} e.chuvilin@skoltech.ru*

Abstract. One of the factors complicating the development of the Arctic territory is the active emission of methane from permafrost. One of the possible reasons for such emission is the destabilization of intrapermafrost gas hydrate formations associated with changes in thermobaric and geochemical conditions, in particular, as a result of salt transfer processes. At the same time, the last factor remains poorly studied, which requires its special consideration. This work is devoted to experimental modeling of the interaction of frozen hydrate-saturated sandy sediments with salt solutions and assessment of various factors (pressure, temperature, composition and concentration of salt solution) on the processes of salt transfer and destabilization of gas hydrates in frozen sediments.

Keywords: arctic permafrost, gas hydrate, salt migration, pressure influence, pore ice, hydrate dissociation, self-preservation, methane emission, environmental impact.

Особенностью толщ мерзлых пород является способность аккумулировать большие объемы газа, в том числе в гидратной форме (преимущественно гидраты метана), которые

могут существовать как в равновесных, так и в неравновесных (метастабильных) условиях (*Chuvilin и др., 2018; Якушев, 2009*). В процессе деградации многолетнемерзлых пород, вызванной естественными и техногенными причинами, газогидратные образования могут быть причиной активных газопроявлений из мерзлоты, что впоследствии может приводить к трансформации парникового эффекта. Дестабилизация внутримерзлотных газогидратных образований может происходить в результате изменения термобарических условий в ходе эволюции криолитозоны (*Chuvilin и др., 2019*), а также при изменении геохимических условий за счет процесса миграции солей (*Chuvilin и др., 2022a*). В отличие от процессов диссоциации внутримерзлотных газогидратных образований при снижении давления и повышении температуры, разложение газовых гидратов в мерзлых породах в условиях солепереноса остается слабо изученным. Проведенное в последнее время экспериментальное моделирование по взаимодействию мерзлых гидратосодержащих пород с солевыми растворами позволяет оценить роль этого фактора в дестабилизации внутримерзлотных газогидратных образований и эмиссии метана в Арктике.

Экспериментальное моделирование включало приготовление мерзлых гидратонасыщенных песчаных образцов, их взаимодействие с растворами солей (преимущественно NaCl) при фиксированных давлениях и отрицательных температурах и наблюдение за процессами диссоциации порового гидрата в ходе солепереноса (*Chuvilin и др., 2022b*).

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при взаимодействии мерзлых гидратонасыщенных пород с солевыми растворами наблюдаются активные процессы солепереноса, которые сопровождаются накоплением ионов солей, фазовыми переходами «лед – вода» и диссоциацией газового гидрата в поровом пространстве. В ходе экспериментов было выявлено, что интенсивность накопления ионов солей в мерзлых гидратосодержащих образцах выше, чем в мерзлых образцах, не содержащих газогидратные образования. В отличие от мерзлых пород, в гидратосодержащих грунтовых средах огромное влияние на процессы солепереноса оказывает давление. Было зафиксировано, что разложение порового газогидрата в мерзлых породах в ходе солепереноса происходит при достижении некоторой критической концентрации солей (рисунок 1), которая зависит от ряда факторов, таких как температура, давление, состав солей, а также характеристики грунта.

При повышении температуры и снижении давления интенсивность солепереноса в мерзлых гидратосодержащих породах увеличивается, а величина критической концентрации, вызывающей полное разложение порового гидрата, снижается.

Так, при повышении отрицательной температуры от -16 до -3 °С критическая концентрация ионов Na^+ в мерзлых гидратосодержащих образцах грунта снижается практически в 8 раз, а плотность потока соли при этом повышается практически на порядок.

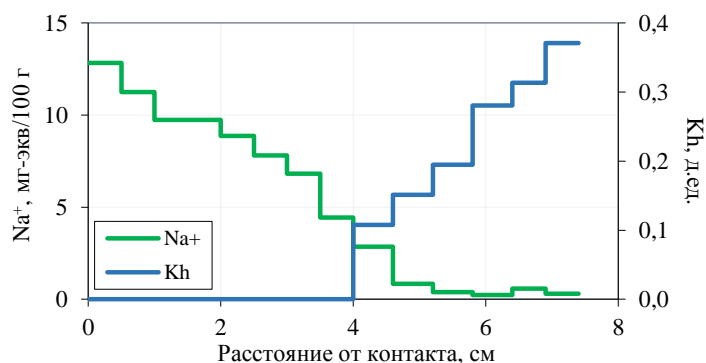


Рисунок 1. Распределение по высоте мерзлого гидратосодержащего песчаного образца концентрации солей (Na^+) и коэффициента гидратности (Kh – доли поровой влаги, находящейся в гидратной форме) после 4 часов взаимодействия с 0,1н раствором NaCl при температуре -6 °С.

Было экспериментально установлено, что в мерзлых гидратосодержащих образцах грунта при снижении давления от значений выше равновесного (4,0 МПа) до давлений ниже равновесного (до 0,1 МПа), поток солей в образец повышается более чем на порядок, а критическая концентрация ионов солей, вызывающая полную диссоциацию порового газового гидрата в мерзлом грунте, снижается в несколько раз.

Анализ экспериментальных данных по влиянию химического состава контактного раствора продемонстрировал увеличение интенсивности миграции и аккумуляции солей, а также диссоциации гидрата в ряду $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{KCl} - \text{CaCl}_2 - \text{NaCl} - \text{MgCl}_2$.

Полученные результаты экспериментального моделирования по взаимодействию мерзлых гидратосодержащих пород с солевыми растворами позволяют по-новому взглянуть на возможные механизмы диссоциации внутримерзлотных газогидратных образований.

Помимо изменения термобарических условий, а также концентрации солей, которые нарушают фазовые равновесия газовых гидратов в мерзлых породах, следует выделять и кинетические процессы, связанные с переносом солей и других химических компонентов в мерзлых гидратосодержащих породах. Их результатом является локальное накопление ионов солей в породах, содержащих гидраты, которое может превышать некоторое критические значения, вызывающие полное разложение газогидрата при заданных термобарических условиях.

Проведенное экспериментальное моделирование позволяет оценить роль солепереноса на дестабилизацию газогидратных образований в толщах мерзлых породах при

их взаимодействии с солевыми растворами, в том числе и при эволюции криолитозоны при трансгрессии арктического моря.

Работа выполнена при поддержке РФФ (гранты № 22-17-00112 и 22-67-00025).

Литература

- Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. – ВНИИГАЗ: Москва, 2009. – 190 с.
- Chuvilin E., Bukhanov B., Davletshina D., Grebenkin S., Istomin V. Dissociation and self-preservation of gas hydrates in permafrost. *Geosciences* 2018, 8, 12, 431:1-431:12.
- Chuvilin E., Davletshina D., Ekimova V., Bukhanov B., Shakhova N., Semiletov I. Role of warming in destabilization of intrapermafrost gas hydrates in the Arctic shelf: Experimental modeling. *Geosciences* 2019, 9, 407:1-407:12.
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D., Bukhanov B., Krivokhat E., Shilenkov V. Migration of salt ions in frozen hydrate-saturated sediments: temperature and chemistry constraints. *Geosciences* 2022, 12, 7, 276.
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D., Krivokhat E., Shilenkov V., Bukhanov B. Pressure influence on salt migration in frozen hydrate-saturated sediments: Experimental modeling. *Energy & Fuels* 2022, 12, 7, 261.

СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА В ГОЛОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА ДЕЛЬТЫ РЕКИ ЛЕНЫ

А.Г. Шепелев^{*}, А.М. Черепанова

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

** carbon-shag@yandex.ru*

Аннотация. Приведены актуальные результаты исследований содержания органического, неорганического и общего углерода в ледовом комплексе островов дельты р. Лены. В арктических тундровых ландшафтах фундаментальным источником углерода являются аллохтонные и автохтонные торфы и оторфованные почвы. Дифференциация почвы и четвертичных отложений на деятельный, защитный слой и многолетнемерзлые породы показали широкую изменчивость органического углерода во вмещающих отложениях в отличие от неорганической фракции углерода. Гетерогенность отложений обуславливает рассредоточенность в пространстве органического углерода вне зависимости от принадлежности к тому или иному элементарному слою и позиции в ландшафте. Максимальное содержание органического углерода свойственно для деятельного слоя (3,70–5,72 %) и многолетнемерзлых пород (3,31 %). По сравнению с органической формой, содержание неорганического углерода в отложениях варьирует в узких пределах – от 0,20 % в деятельном слое, 0,21 % – в защитном слое и до 0,14 % – в многолетнемерзлых породах.

Ключевые слова: органический углерод, неорганический углерод, общий углерод, многолетнемерзлые породы.

CARBON CONTENT IN THE HOLOCENE SEDIMENTS OF THE ICE COMPLEX, LENA RIVER DELTA

A.G. Shepelev^{*}, A.M. Cherepanova

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation

** carbon-shag@yandex.ru*

Abstract. The current results in study of organic, inorganic and total carbon content in the ice complex of islands within the Lena river delta are presented. Allochthonous and autochthonous peat and peaty soils are fundamental sources of carbon in the arctic tundra landscapes. The differentiation of soil and Quaternary sediments into active layer, shielding layer and permafrost showed a wide variability of organic carbon in host sediments unlike inorganic fraction of carbon. The heterogeneity of sediments determines the dispersion of organic carbon in space, regardless of belonging to one or another elementary layer and position in the landscape. The maximum content of organic carbon is typical of the active layer (3.70-5.72%) and permafrost (3.31%). The content of inorganic carbon in sediments varies within narrow limits from 0.20% in the active layer, and 0.21% in the shielding layer, and up to 0.14% in permafrost.

Keywords: organic carbon, inorganic carbon, total carbon, permafrost.

В количественном выражении в циркумполярной области наземного органического углерода содержится порядка 1300–1395 Гт (*Hugelius et al., 2013*), а в многолетнемерзлых отложениях – 850 Гт (*Tarnocai et al., 2009*). Суммарный пул углерода в тундровых почвах и отложениях оценивается в 1400–1850 Гт (*Schuur et al., 2008*). Флуктуации экосистемы инициируют таяние ледового комплекса, который может превратиться из поглотителя углерода в неизбежный источник (*Schuur et al., 2009*) благодаря насыщенности органическим материалом и илистыми фракциями. При дифференциации углерода по времени консервации в многолетней мерзлоте отложения позднего плейстоцена вмещают 83 Гт (*Strauss et al., 2015*), а в голоценовых термокарстовых образованиях – 130 Гт органического углерода (*Walter et al., 2014*).

Подземный органический углерод в исследованных разрезах заметно выше неорганической формы (табл. 1). Отчасти это связано с физическими криогенными процессами, приводящими к заполнению морозобойных трещин растительно-торфянистым субстратом, а также выносом углерода поверхностными сезонными водотоками и выщелачиванием минералов в условиях полярного типа гумидного климата. Поступление и аккумуляция углерода на поверхности и в толщах примитивных почв осуществляется под непрерывным влиянием термокарстовых процессов, формирующих аласные формы рельефа в результате вытаивания подземных льдов, в том числе образование озерно-болотных равнин с аллювиальными и болотными отложениями. В разнородных средах транспорт и распределение углерода рассредоточены неравномерно в пространстве отложений. Источники углерода перемещаются в трещины между почвой и клиньями повторно-жильных льдов. При их оттаивании почвенная масса с остатками растений опускается в глубину освободившейся области без льда и там консервируется обрушившейся сверху почвой. В таких условиях образуются локальные беспорядочные очаги пятен гумифицированных органических остатков и конгломераты торфа с песком, супесью или суглинком. На островах значительная часть углерода находится во вмещающих породах благодаря аллохтонному и автохтонному торфу, что нами фиксировалось при исследовании территории. Здесь мощность залежей торфа составляет до 4,5 м на о. Курунгнах-Сисе и до 2,0–2,5 м на о. Самойловский. На о. Курунгнах-Сисе органического углерода в деятельном слое и в многолетнемерзлых породах (ММП) содержится больше, чем в защитном слое на 48 и 42 % соответственно. Доля неорганической фракции углерода незначительная, составляющая всего лишь 6 % от органического углерода, причем в ММП насыщенность неорганическим углеродом снижается почти в 2 раза по сравнению с двумя верхними слоями. На о. Самойловский зафиксировано максимальное содержание органического углерода в деятельном слое. В защитном слое из-за его малой мощности содержание превышает в ММП на 45 %. Доля неорганической фракции углерода

составляет 4 % в деятельном слое, 7 % в защитном слое и 11 % в ММП от общего содержания органического углерода.

Неорганический углерод на участках варьировал ограниченно в пределах стандартного отклонения, а коэффициент дисперсии был близок к нулю. Коэффициент вариации неорганического углерода по сравнению с органическим углеродом на 43 % ниже. Свидетельством этого служит избыток аллохтонного торфа на низинных пойменных участках островов, который привносится современными геологическими и русловыми процессами извне, тем самым усиливая вымывание речными водами минералов карбонатной группы, неспособных закрепиться в породах. Автохтонный торф тоже подвергается указанным процессам; связано это с боковым промыванием берегов потоками воды, движущихся с верховьев реки, что способствует не только вымыванию минералов и растворению углерода, но и разрушению островной береговой линии.

Таблица 1

Распределение различных фракций углерода в толще элементарных слоев и в многолетнемерзлых породах дельтовых островов р. Лены

Слой, см	Содержание углерода, %		
	органический	неорганический	общий
о. Курунгнах-Сисе			
Деятельный (0–70)	3,70	0,20	3,90
Защитный (промежуточный) (70–140)	1,92	0,21	2,13
ММП (140–460)	3,31	0,14	3,45
о. Самойловский			
Деятельный (0–70)	5,72	0,24	5,96
Защитный (промежуточный) (70–130)	4,36	0,31	4,67
ММП (130–400)	2,41	0,26	2,67

Заключение

Региональная оценка углерода в арктических ландшафтах и отложениях имеет неоспоримое значение в познании функционирования криогенных геосистем в свете текущего и будущего развития биомов криолитозоны, а также для обобщения оценок пулов органических соединений в Северном полушарии. Существующая аккумуляция органических и растительных остатков на островах дельты р. Лены сохраняется по настоящее время вопреки термоабразии и деградации многолетней мерзлоты. Подземный углеродный пул мерзлотных ландшафтов Арктики в планетарном масштабе играет одну из ведущих ролей в декарбонизации и поглощении активных газов атмосферы.

Работа выполнена в рамках базового проекта «Криогенные процессы и формирование природных рисков освоения мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (№ АААА-А20-

120111690009-6) при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

Hugelius G., Bockheim J.G., Camill P., Elberling B., Grosse G., Harden J.W. et al. A new data set for estimating organic carbon storage to 3 m depth in soils of the northern circumpolar permafrost region // *Earth System Science Data*. Vol. 5. – 2013 – Pp. 393-402.

Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global biogeochemical cycles*. Vol. 23. – 2009. – Pp. GB2023.

Schuur E.A.G., Lee H., Vogel J.G., Bockheim J., Canadell J.G., Euskirchen E., et al. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle // *Bioscience*. Vol. 58. – 2008. – Pp. 701-714.

Strauss J., Schirrmeister L., Mangelsdorf K., Eichhorn L., Wetterich S., Herzsich U. Organic-matter quality of deep permafrost carbon – a study from Arctic Siberia // *Biogeosciences*. Vol. 12. – 2015. – Pp. 2227-2245.

Walter K.M., Zimov S.A., Grosse G., Jones M.C., Anthony P.M., Chapin III F.S. et al. A shift of thermokarst lakes from carbon sources to sinks during the Holocene epoch // *Nature*. Vol. 511. – 2014. – Pp. 452-456.

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕРЗЛОТНО-ГРУНТОВОЙ БРИГАДЫ СОПС АН СССР В ЯКУТИИ (1937 г.)

В.В. Шепелёв*, Р.Н. Иванова

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

**vshepelev@mpi.ysn.ru*

Аннотация. Раскрывается вклад основателя науки мерзлотоведения профессора М.И. Сумгина в изучение мерзлотных условий г. Якутска. Им в составе мерзлотно-грунтовой бригады Совета по изучению производительных сил Академии наук СССР в 1937 г. были изучены криогенные процессы и явления в г. Якутске и его окрестностях, а также были даны рекомендации по строительству и эксплуатации наиболее важных для народного хозяйства Якутии инженерных сооружений. По материалам этой поездки М.И. Сумгиным в 1938 г. была написана и опубликована программная статья, в которой он изложил основные направления в изучении вечной мерзлоты в Якутии.

Ключевые слова: Сумгин, Цытович, Цодиков, Якутск, инженерные сооружения, строительство и устойчивость.

RESEARCH OF THE PERMAFROST-GROUND TEAM OF THE COUNCIL OF THE USSR ACADEMY OF SCIENCES IN YAKUTIA IN 1937

V.V. Shepelev*, R.N. Ivanova

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

**vshepelev@mpi.ysn.ru*

Abstract. The report reveals the contribution of the founder of geocryology science professor M.I. Sumgin to studying the permafrost conditions of Yakutsk. As a member of the permafrost-ground team of the Council for Study of Productive Forces of the USSR Academy of Sciences, he in 1937 studied the cryogenic processes and phenomena in Yakutsk and its surroundings, and gave recommendations for building and exploitation of the most important engineering structures for the national economy of Yakutia. Based on the materials of this investigation, M.I. Sumgin wrote and published a program article in 1938, in which he outlined the main directions in the study of permafrost in Yakutia.

Keywords: Sumgin, Tsytovich, Tsodikov, Yakutsk, Engineering Structures, Construction and Stability.

17 мая 1937 г. в Москве между Советом по изучению производительных сил Академии Наук СССР (далее – СОПС АН СССР) и Советом Народных Комиссаров Якутской АССР был подписан договор «О проведении консультаций по ответственным объектам строительства в городе Якутске» путём организации мерзлотно-грунтовой бригады в г. Якутске (*Нац. архив РС(Я), ф. Р-68, оп. 1, д. 3078, л. 9*). Согласно данному договору, АН

СССР командировала в г. Якутск экспертную мерзлотно-грунтовую бригаду в составе руководителя бригады В.М. Цодикова, членов-консультантов М.И. Сумгина и Н.А. Цытовича (*Сумгин, 1938*).

Командировка в Якутию длилась с 29 мая по 7 августа 1937 года. За это время кроме Якутска также были посещены другие населённые пункты – село Покровское (ныне г. Покровск) и посёлок Незаметный (ныне г. Алдан).

27 июня был произведён осмотр местности аэродрома г. Якутска и проведена шурфовка со взятием проб грунта для анализов. Было задано три шурфа на существующих лётных полосах и один – на месте планируемого аэровокзала для определения гранулометрического состава и естественной влажности грунтов. Было рекомендовано произвести планировку местности, обратить внимание на целостность грунтового покрытия и обеспечение дренажа территории. В целом, место аэродрома и аэровокзала было признано удачным с точки зрения мерзлотно-грунтовых условий (*Нац. архив РС(Я), ф. Р-68, оп. 1, д. 3077, л. 13-16*).

Бригадой было обследовано аварийное здание почты, располагавшееся на улице Батрацкая (бывшая Малобазарная, ныне не существует) дом 3 – двухэтажное кирпичное здание, построенное ещё до революции (*Попов, 2009*). При осмотре было обнаружено, что здание почты имеет во всех стенах и у большинства перемычек над окнами и дверями открытые трещины. В целях своевременного предупреждения находящихся в здании людей было предложено установить «маяки» и организовать непрерывное наблюдение за трещинами, связать и укрепить стены, изолировать нетеплопроводными материалами (опилками, мхом) грунт возле деформирующейся стены на ширину 3-4 метра. После закрепления стен предлагалось обследовать с помощью шурфов и скважин фундаменты, их сохранность и глубину заложения, свойства грунтов ниже подошвы фундаментов (влажность, объёмный вес, осадка при оттаивании) и на основании этих результатов установить мероприятия по капитальному укреплению здания (*Нац. архив РС(Я), ф. Р-52, оп. 15, д. 215, л. 101-102*).

Была произведена консультация по вопросу устройства полотна проезжей части городских улиц и применения усовершенствованных мостовых переходов в г. Якутске. Было отмечено, что улицы города находятся в совершенно неудовлетворительном состоянии – отмечается пыль толщиной 10 см в сухое время, которая вследствие отсутствия стока во время дождей превращается в непроходимую жижу, приводящую к образованию колеи глубиной до 40 см. Летом, особенно во вторую половину, появляются бугры пучения с тестообразной консистенцией. На четырёх центральных улицах г. Якутска были отобраны образцы пород с разных глубин (от 40 до 120 см) и определена их насыщенность водой или

льдом (*Нац. архив РС(Я), ф. Р-68, оп. 1, д. 3077, л. 24-30*). Консультанты отметили, что основным общим мероприятием является тщательный отвод дождевых вод с применением поперечных и продольных дренажных устройств, необходима планировка улиц с поперечным уклоном. Для успеха перечисленных работ рекомендовано проводить борьбу с пучением (дренаж и замена пучинистого грунта), усовершенствовать мостовые переходы (асфальт, торцовые мостовые, гравийные покрытия).

В заключении консультаций по вопросу устройства опор деревянных мостов М.И. Сумгин и Н.А. Цытович отметили, что в Якутске они повсеместно деформированы: опоры, находящиеся в воде, имеют усадку, а находящиеся на берегу выпучены. Специалисты посоветовали по возможности делать однопролётные мосты без устройства промежуточных опор, верхние строения делать разрезными, основания опор располагать в вечной мерзлоте на глубине от поверхности земли порядка удвоенной мощности деятельного слоя, т.е. в условиях Якутска на глубине 4-5 метров, а береговые уступы для сохранения мерзлотного режима затенять посадкой кустарниковой растительности.

Последующие дни учёные посвятили большому блоку консультаций по водоснабжению и водоотведению в городе и отдельных его объектов. Так, были рассмотрены: 1) проблема сквозной проточки водоёмов г. Якутска и обустройство каналов и плотин для этого; 2) вопрос обеспечения населения г. Якутска питьевой водой по трассе опытного водопровода; 3) проблема устройства водозабора, насосной, подводки воды из насосной в здание машинного зала ЯЦЭС, а также по вопросу мероприятий, способствующих увеличению устойчивости фундаментов здания ЯЦЭС и городских её подстанций в связи с вечной мерзлотой; 4) проблема проведения изысканий подмерзлотных вод, как источника водоснабжения для населения г. Якутска, произведённых партией инженера Светозарова И.М. (треста «Коммунстрой» Наркомхоза РСФСР).

Также были даны отдельные консультации по вопросу оснований и фундаментов запроектированного к постройке каменного жилого 2-хэтажного здания Наркомзема по ул. Красноармейской, д. 53 и лесопильного завода. На строительной площадке этого здания было задано два шурфа глубиной до 3 м, обследованы влажность, сжимаемость и механические свойства грунтов основания как в мёрзлом, так и в талом их состояниях под нагрузкой. Для повышения устойчивости каменных зданий было предложено вести их строительство по принципу сохранения вечной мерзлоты с проветриваемым зимой подпольем; рекомендовано, что глубина заложения столбчатых фундаментов здания должна быть не менее 3,5 м от поверхности.

Были осуществлены поездки членов бригады за пределы Якутска: в пос. Жатай – для осмотра площадки, выбранной Якутским теруправлением ГУСМП для обустройства затона и

строительной базы; в пос. Покровск – для консультации по вопросу оценки оснований и фундаментов строящегося здания гофманской печи и здания силовой кирпичного завода; в г. Алдан – по вопросу оснований и фундаментов Якутской ЦЭС треста «Якутзолото».

На основе обобщения материалов, полученных в результате этой поездки, М.И. Сумгин написал и опубликовал в 1938 г. обстоятельную программную статью, в которой изложил основные направления дальнейшего изучения вечной мерзлоты в Якутии.

Литература

НА РС(Я), ф. Р-52, оп. 15, д. 215.

НА РС(Я), ф. Р-68, оп. 1, д. 3077.

НА РС(Я), ф. Р-68, оп. 1, д. 3078.

НА РС(Я), ф. Р-55, оп. 12, д. 535.

Попов П.В. Историко-графический атлас города Якутска в 1917 г. / Сост.: И.И. Юрганова, П.П. Петров, Л.Н. Жукова и др. – Якутск: Якутский край, 2009. – 162 с.

Сумгин М.И. К вопросу о перспективах изучения вечной мерзлоты в Якутской республике. – Труды Комитета по вечной мерзлоте. – Т. IX. – М.: КОВМ и СОПС, 1938. – 26 с.

НОВАЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ЯКУТИИ МАСШТАБА 1:1 500 000

**А.А. Шестакова^{*}, Я.И. Торговкин, Н.Ф. Васильев, Н.И. Башарин,
Н.Н. Никифорова, С.В. Калиничева, В.А. Ефремова, В.А. Новоприезжая**
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия
**aashest@mail.ru*

Аннотация. На основе обобщения многолетних результатов работ большого коллектива научных сотрудников Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН составлена Геокриологическая карта Якутии масштаба 1:1 500 000, в которой обобщены современные сведения о геокриологических, геологических и гидрогеологических особенностях данной территории. Приведена методика составления карты, легенда и информация о распределении многолетнемерзлых пород по температуре, льдистости поверхностных отложений, мощности сезонно-талого и сезонно-мерзлого слоев и криогенных процессах.

Ключевые слова: геокриологическая карта, температура, льдистость, сезонно-талый слой, мерзлотные ландшафты, многолетнемерзлые породы.

NEW GEOCRYOLOGICAL MAP OF YAKUTIA SCALE 1:1 500 000

**A.A. Shestakova^{*}, Y.I. Torgovkin, N.F. Vasiliev, N.I. Basharin, N.N. Nikiforova,
S.V. Kalinicheva, V.A. Efremova, V.A. Novopriezzaya**
*I – Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk,
Russia*
** aashest@mail.ru*

Abstract. Based on the generalization of long-term results of the work of a large team of researchers from the Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences compiled a Geocryological map of Yakutia at a scale of 1:1,500,000, which summarizes modern information about the geocryological, geological and hydrogeological features of this territory. The method of mapping, the legend and information on the distribution of permafrost by temperature, ice content of surface deposits, the thickness of seasonally thawed and seasonally frozen layers, and cryogenic processes are given.

Keywords: geocryological map, temperature, ice content, seasonally thawed layer, permafrost landscapes, permafrost.

Новая Геокриологическая карта Якутии масштаба 1:1 500 000 составлена на базе ГИС-приложения ArcGis 10.1 (рис. 1). Основой для составления карты послужила Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия) масштаба 1:1 500 000 (*Fedorov et*

al., 2018). При уточнении состава рыхлых отложений четвертичного периода использовалась Инженерно-геологическая карта Республики Саха (Якутия) масштаба 1:1 500 000 (Спектор и др., 2017). Разработка специального содержания карты опиралась на изучение межкомпонентных связей в мерзлотных ландшафтах и заключалась в том, что путем анализа и синтеза всех имеющихся материалов (опубликованных, фондовых и аэрокосмических в сочетании с личными данными авторов) выявлялась сущность распределения геокриологических условий.

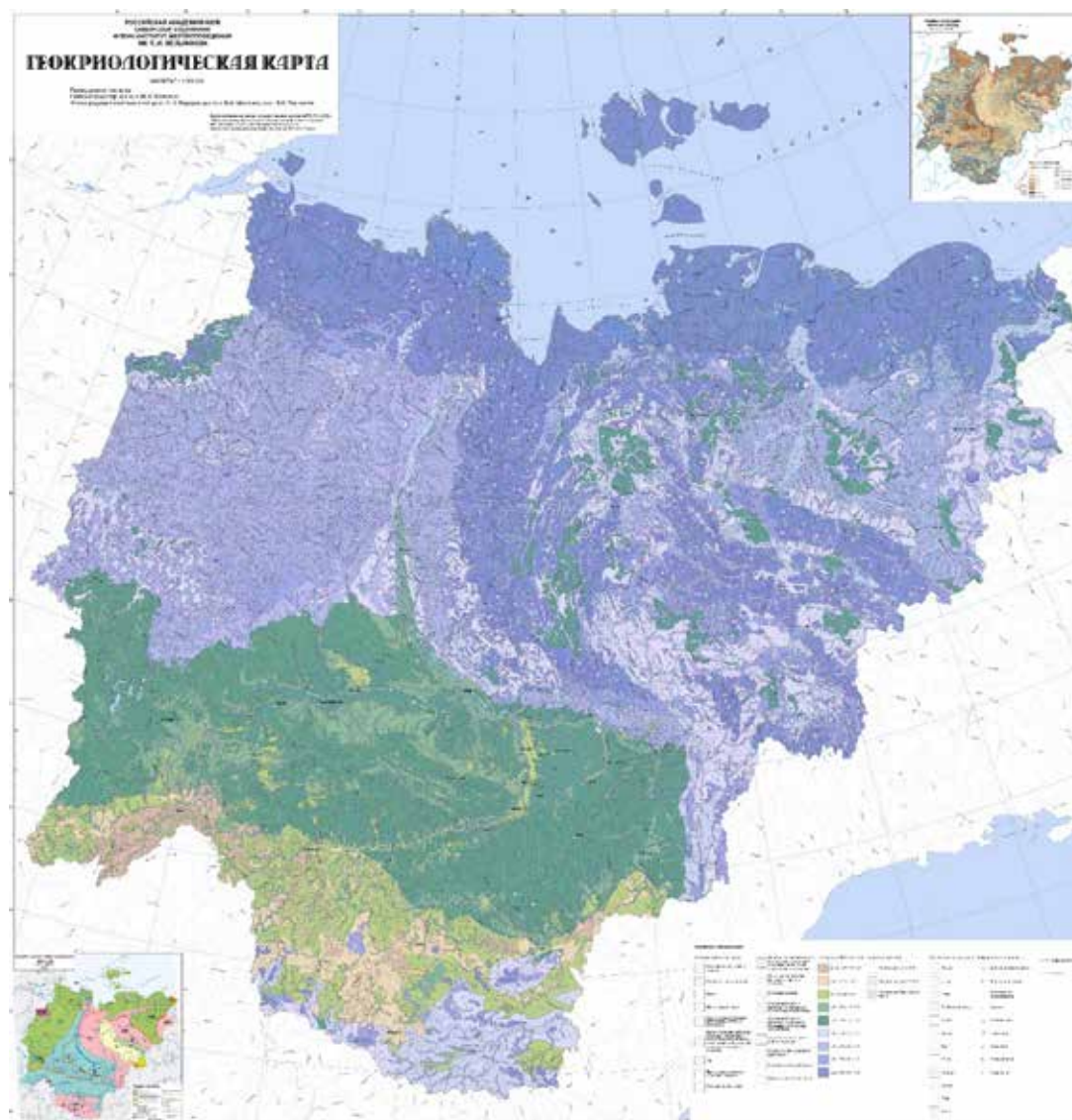


Рисунок 1. Геокриологическая карта Якутии масштаба 1:1 500 000.

На картосоставительском этапе работ решена задача картографического отображения слоев Геокриологической карты, как сопряженных систем взаимосвязанных компонентов, в своеобразную пространственную модель. Легенда Геокриологической карты состоит из шести слоев, условно объединенных в две группы: грунтовая составляющая (рыхлые

поверхностные отложения с мощностью 3–17 м) и геокриологические свойства пород (средняя годовая температура, льдистость отложений, глубина сезонно-талого (мерзлого) слоя, мощность мерзлой толщи и криогенные процессы) (рис. 2). Особая роль отводилась выбору способов изображения и оформления слоев карты для обеспечения её лучшей наглядности. Каждому слою были отданы собственные изобразительные средства. Так, среднегодовая температура и глубина сезонно-талого слоя на карте даны качественным фоном (их соотношения приведены в легенде карты (рис. 2)). Литологический состав пород был показан с помощью крапа, льдистость грунтов – цветной штриховкой, мощность мерзлой толщи – изолиниями, а криогенные процессы – значками.

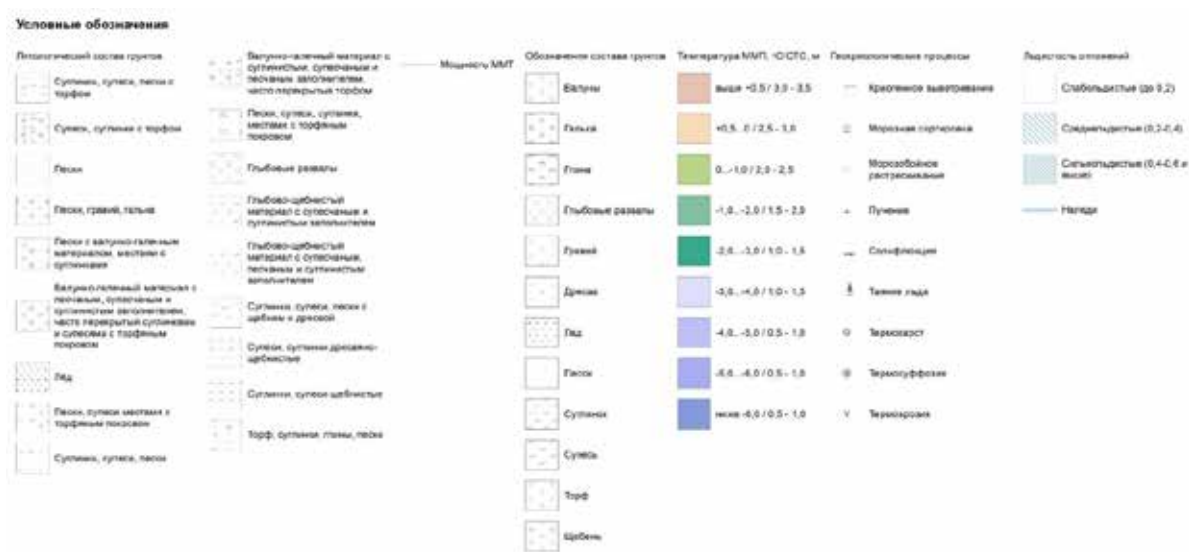


Рисунок 2. Легенда Геокриологической карты Якутии масштаба 1:1 500 000.

Всего в легенде выделено 18 разновидностей грунтов, представленных различными сочетаниями. Отображение на карте температуры мерзлых пород через единичный интервал, а талых через 0,5 °С обусловлено необходимостью генерализации (обобщения) ввиду того, что территория Якутии не повсеместно обеспечена фактическими данными по температуре подстилающих пород. Льдистость отложений коррелируется с генетическим (стратиграфо-генетическим) типом отложений, коренными породами, рельефом и составом поверхностных отложений в пределах типов (подтипов) местности. На карте показаны слабольдистые, среднельдистые и сильнольдистые грунты. Мощность мерзлой толщи (ММТ) – это зональный фактор, который зависит в основном от внутриземного теплового потока, а также от среднегодовой температуры на глубине годовых нулевых амплитуд температуры и теплопроводности пород (Железняк, 2005). Криогенные процессы тесно взаимосвязаны с льдистостью отложений. Слабая льдистость отложений предполагает ограниченное развитие криогенных процессов.

К электронной версии Геокриологической карты прилагается атрибутивная таблица, в которой раскрывается содержание каждого из слоев и их взаимосвязь. Также к карте прилагаются мелкомасштабные (1:10 000 000) карты-врезки глубин залегания коренных пород и Гидрогеологическая карта Якутии.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 4964 по теме: «Прогноз изменения геокриологических условий и риски освоения криолитозоны. Использование криогенных ресурсов и ресурсов подземной гидросферы Якутии».

Литература

Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 2005. – 227 с.

Спектор В.Б., Шестакова А.А., Торговкин Я.И. Инженерно-геологическая карта Республики Саха (Якутия) // Инженерная геология. – № 2. – 2017. – С. 42–51.

Fedorov A.N., Vasilyev N.F., Torgovkin Y.I., Shestakova A.A., Varlamov S.P., Zheleznyak M.N., Shepelev V.V., Konstantinov P.Y., Kalinicheva S.V., Basharin N.I., Makarov V.S., Ugarov I.S., Efremov P.V., Argunov R.N., Egorova L.S., Samsonova V.V., Shepelev A.G., Vasiliev A.I., Ivanova R.N., Galanin A.A., Lytkin V.M., Kuzmin G.P., Kunitsky V.V. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) at scale 1:1,500,000 // Geosciences. 8, 465 - 2018, doi:10.3390/geosciences8120465.

СЕКЦИЯ 2

ТЕПЛОВОЕ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В КРИОЛИТОЗОНЕ. ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ИЗЫСКАНИЙ НА СЕВЕРЕ

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ НАСЫПИ **Г.Н. Антоновская^{1*}, Н.К. Капустян^{1,2}, И.М. Басакина¹, В.С. Шиленкова³**

1 – Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад.

Н.П. Лавёрова УрО РАН, г. Архангельск, Россия

2 – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

3 – Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Россия

** essm.ras@gmail.com*

Аннотация. Представлены основы пионерской отечественной разработки по определению в условиях естественного залегания модуля сдвига грунта железнодорожной насыпи. Способ состоит в сейсмометрической регистрации на берме колебаний от проходящих поездов и сопоставлением с расчетами, использующими аналитическое решение задачи деформирования насыпи. Способ предназначен для дистанционного непрерывного мониторинга состояния грунта насыпи.

Ключевые слова: грунт, железнодорожная насыпь, сейсмометрия, модуль сдвига, мониторинг.

NON-DESTRUCTIVE SEISMOMETRIC METHOD OF ELASTIC CHARACTERISTIC OF RAILWAY SUBGRADE

G.N. Antonovskaya^{1*}, N.K. Kapustian^{1,2}, I.M. Basakina¹, V.S. Shilenkova³

1 – N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia

2 – Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

3 – Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

** essm.ras@gmail.com*

Abstract. The pioneer Russian development basis on definition in situ the ground shear modulus of the railway subgrade. The method consists in seismometric recording of oscillations from passing trains on the berm and comparison with calculations using an analytical solution of the problem of deformation of the embankment. The method is designed for remote continuous monitoring of the soil condition of the embankment.

Keywords: ground, railway subgrade, seismometry, shear modulus, monitoring.

В настоящее время для железнодорожных перевозок осваиваются труднодоступные регионы, в том числе в криолитозоне, на заболоченных территориях, на «плохих» грунтах. Учитывая, что стабильность свойств насыпи напрямую связана с безопасностью движения поездов, задача контроля состояния грунтов является актуальной. Несмотря на разнообразные защитные мероприятия, изменения в грунтах происходят, например, даже при погодных сезонных вариациях (Kapustian et al., 2022). Важно заметить опасные процессы на ранней стадии развития, т.е. необходимо вести непрерывный мониторинг состояния насыпи способом с чувствительностью на уровне погодных вариаций упругих параметров грунта. Такие работы возможны, причем при максимально простой технологии, в

том числе при применении неразрушающих способов. Одна из возможностей – использование поездов, как источников деформирующего воздействия на грунт с регистрацией возникающих колебаний автономной сейсмометрической установкой на берме. В этом случае современные средства передачи данных дают возможность вести мониторинг дистанционно. Нами предложен такой способ, успешно опробованный на участках Северной железной дороги в Архангельской обл. (Kapustian et al., 2022).

Основой неразрушающего способа является модифицированное И.П. Добровольским аналитическое решение теоретической задачи нагружения поверхности, ограничивающей упругое полупространство и деформирование насыпи движущимся поездом (Новацкий, 1975). При регистрации в направлениях (x, y, z) , в точке расположения датчика $(z_d, y_d, x_d = 0)$, вертикальная составляющая виброскорости на берме равна:

$$S = \frac{dw}{dt} = - \frac{PV(L-Vt)(15z^2+8R^2)}{20\pi\mu R^5}, \quad (1)$$

где $R = \sqrt{(Vt - L)^2 + y^2 + z^2}$, μ – модуль сдвига, P – нагрузка, V – скорость движения состава, L – отставание от точки $t = 0$, определяется расположением осей колесных пар).

Используя выражение (1), можно рассчитать теоретическую сейсмограмму виброскорости, например, для состава из 50 одинаковых вагонов со скоростью 15 м/с (54 км/час) (рис. 1, а). На рис. 1, б приведена реальная сейсмограмма, полученная из исходной широкополосной сейсмической записи (0.008–100 Гц) путем фильтрации в полосе 0.01–1.25 Гц, определяемой частотами теоретической сейсмограммы.

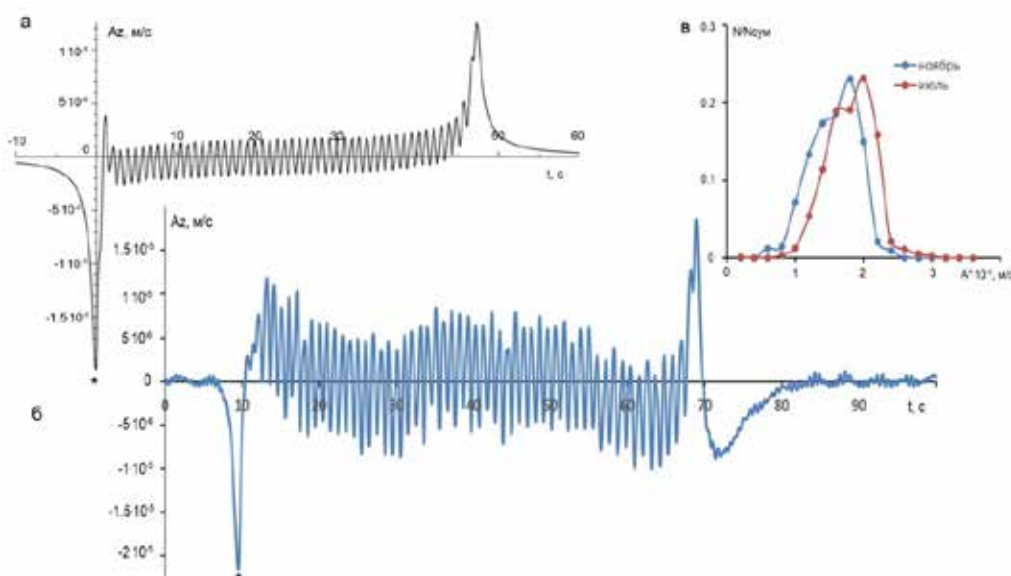


Рисунок 1. Базовые параметры способа: расчетная (а) и экспериментальная (б) сейсмограммы, в – распределение значений амплитуд первого экстремума при мониторинге.

Сравнение сейсмограмм рис. 1 показывает их очень хорошее согласие, причем не только качественное, но и количественное. Начало и конец записи характеризуется относительно низкочастотными всплесками амплитуд, средняя часть волновой формы – синусоидальный «дребезг». Вариации амплитуд в средней части фильтрованной исходной записи определяются вкладом низкочастотной составляющей, связанной, по-видимому, с неидеальностью земляного полотна, неоднородностью вагонов в составе и неравномерностью хода поезда. Для мониторинга мы использовали значения амплитуды первого экстремума (отмечен *), т.е. при $t = 0$. Существенно, что его амплитуда определяется модулем сдвига и весом локомотива, причем влияние вариаций веса можно уменьшить статистической обработкой. Мы проводили длительные наблюдения, при которых происходили сезонные изменения в грунтах. Учитывая, что в сутки проходит примерно 40 поездов, а свойства грунтов заметно меняются за несколько суток, определение модуля сдвига для грунтов насыпи производится путем сравнения расчетных значений амплитуд при разных μ и их медианного значения по экспериментальной статистике (рис. 1, в).

Для демонстрации чувствительности метода сравним распределения амплитуд, полученных в ноябре 2021 и июле 2022 гг. (см. рис. 1, в), т.е. при разном состоянии грунтов. Видно, что медианные значения отличаются: в ноябре $1.8 \cdot 10^{-5}$ м/с, в июле $2.0 \cdot 10^{-5}$ м/с. При нагрузке на ось 50 т подбор значений μ дает для ноября $\mu = 5.5 \cdot 10^7$ Па и для июля – $\mu = 5 \cdot 10^7$ Па. Оценим точность определения μ . В эксперименте точность определения амплитуды зависит от соотношения уровня микросейсм на данной частоте и амплитуды сигнала, в нашем случае это не более 10 %. Из (1) следует, что точность определения μ также будет ~ 10 %. Учитывая, что $V_s = (\mu/\rho)^{1/2}$, и полагая, что ρ меняется мало, получаем изменение V_s на 5 %. Это на грани разрешающей способности малоглубинной сейсморазведки на SH-волнах. В нашем случае значения на берме $V_s = 150$ м/с. При $\rho = 2000$ кг/м³, характерной для уплотненного грунта насыпи, получаем $\mu \sim 5 \cdot 10^7$ Па. Отметим, что значения V_s определены при плотной системе наблюдения по SH-волнам, изменение скоростей на 10 м/с (5 %) получить крайне трудно. Таким образом, точность определения μ *in situ* путем сопоставления расчетов и экспериментально измеренных амплитуд превосходит имеющиеся традиционные возможности.

Полученные результаты могут составить основу простой и технологичной методики мониторинга опасных процессов в грунтах насыпи, т.к. не требуется проведения специальных работ (например, сейсморазведки), установка датчика не нарушает структуру насыпи и не мешает движению поездов. Исходя из нашего опыта, возможно создать условия для автономной регистрации, т.е. для проведения мониторинга состояния насыпи с выявлением опасных процессов на ранней стадии.

Литература

Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с. https://pnu.edu.ru/media/filer_public/2013/04/10/5-2_novacky_1975.pdf.

Kapustian N.K., Antonovskaya G.N., Orlova I.P. Soil State Testing Using Heavy Vehicle Vibrations // Energies. Vol. 15, no. 3, no. article 830 – 2022. DOI: 10.3390/en15030830.

НОВЫЙ СПОСОБ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВАНИЙ ОДНОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

А.А. Горбунова*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
GorbunovaAA@my.msu.ru

Аннотация. В работе рассматривается новая конструкция фундамента (поверхностный фундамент со встроенными контурами теплового насоса), который был изобретен на кафедре геокриологии МГУ в 2016 г. для строительства одноэтажных зданий на высокотемпературных многолетнемерзлых грунтах.

Ключевые слова: многолетнемерзлый грунт, глобальное потепление климата, поверхностный фундамент, тепловой насос, экономический эффект.

A NEW WAY OF USING HIGH-TEMPERATURE PERMAFROST SOILS AS THE FOUNDATIONS OF SINGLE-STORY BUILDINGS

A.A. Gorbunova*

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
GorbunovaAA@my.msu.ru

Abstract. The paper considers a new foundation design (a surface foundation with integrated heat pump circuits), which was invented at the Department of Geocryology of Moscow State University in 2016 for the construction of single-storey buildings on high-temperature permafrost soils.

Keywords: permafrost, global climate warming, surface foundation, heat pump, economic effect.

Глобальное потепление климата особенно опасно в районах с высокотемпературными многолетнемерзлыми грунтами (ММГ), поскольку с ним связано опускание кровли ММГ, следствием которого являются массовые деформации инженерных сооружений. Поэтому в настоящее время одним из основных приоритетов в строительной отрасли является поиск новых эффективных способов использования высокотемпературных ММГ в качестве оснований в условиях глобального потепления климата. Одним из таких новых способов строительства зданий является применение для них поверхностного фундамента со встроенными контурами теплового насоса, который был изобретен на кафедре геокриологии МГУ в 2016 г. (Хрусталева и др., 2016).

Нами предпринята попытка оценить возможности такого фундамента с помощью его цифровой модели на конкретном объекте, который запроектирован на дорогостоящем свайном фундаменте с применением вентилируемого подполья и термосифонов, и предложить альтернативный вариант.

В результате работы определено, что поверхностный фундамент со встроенными контурами теплового насоса позволяет надежно купировать негативные последствия глобального потепления климата в районах распространения высокотемпературных многолетнемерзлых грунтов и по сравнению с широко применяемыми в настоящее время свайными фундаментами и термосифонами имеет следующие преимущества:

- гарантированно обеспечивает мерзлое состояние грунтов основания независимо от климата. Расчеты, выполненные в программном комплексе «Frost 3D Universal» с учетом солнечной радиации и глобального потепления, показали, что кровля многолетнемерзлых грунтов за пределами контура здания за 50 лет опустится на 9,5 м с глубины 10,5 до 20 м. При этом поверхностный фундамент здания, совмещенный с тепловым насосом, обеспечивает мерзлое состояние грунтов основания здания на весь период его эксплуатации. Тренд потепления определен из метеорологических данных по методике авторетроспективного анализа, разработанной на кафедре геокриологии МГУ в 2000 г. (Хрусталева и др., 2000);
- осуществляет обогрев помещений первого этажа здания;
- дает большую экономию капитальных вложений (61,2 %) и текущих затрат (55,3 %), за счет расположения фундамента на дневной поверхности без его заглубления в грунт и выполнения фундаментом одновременно трех функций: передачи нагрузки от здания на основание, охлаждения основания и обогрева помещения.

Освоенный в работе новый способ сохранения мерзлого состояния грунтов в основании здания, по нашему мнению, будучи использован на практике, станет хорошим ответом на новый природный вызов – глобальное потепление климата.

Литература

Хрусталева Л.Н., Медведев А.В., Пустовойт Г.П. Многолетние изменения температуры воздуха и устойчивость проектируемых в криолитозоне сооружений // Криосфера Земли. – 2000. – Т. 4, № 3. – С. 35–41.

Хрусталева Л.Н., Хилимонюк В.З., Перльштейн Г.З., Каманин Д.В. Поверхностный фундамент сооружения, обеспечивающий сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии с одновременным обогревом сооружения. Патент № 2583025, Бюл. № 12, 2016.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОДПОЛЬЯ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ НА ПРИМЕРЕ ЗДАНИЙ Г. ЯКУТСКА

А. С. Деревцов*, А. Я. Никифоров

*Инженерно-технический институт Северо-Восточного федерального университета
им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия*

** Derevtcov.as@yandex.ru*

Аннотация. Оценка влияния температурного режима подполья на многолетнемерзлые грунты оснований зданий города Якутска с проведением полевых исследований путем замеров фактических температур многолетнемерзлых грунтов в температурных трубах и построение математической модели прогноза изменения температур многолетнемерзлых грунтов.

Ключевые слова: температурный режим, многолетнемерзлые грунты, прогноз температур.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF UNDERGROUND TEMPERATURE ON PERMAFROST SOILS, ON THE EXAMPLE OF BUILDINGS IN YAKUTSK

A. S. Derevtsov*, A. Ya. Nikiforov

Engineering and Technical Institute of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov

* Derevtcov.as@yandex.ru

Abstract. Evaluation of the influence of the temperature regime of the underground on the perennially frozen soils of the foundations of buildings in the city of Yakutsk, with field research by measuring the actual temperatures of permafrost soils in temperature tubes, and building a mathematical model for predicting temperature changes in perennially frozen soils.

Keywords: temperature regime, permafrost soils, temperature forecast.

Для оценки влияния теплового режима здания на грунты основания были проведены замеры температуры грунтов рядом стоящих зданий в 32 округе г. Якутска в период с 2020 по 2022 г.

Замеры температуры грунтов проводились на объектах: 1) многоквартирный жилой дом по адресу: г. Якутск, ул. Островского, 2 (здание № 1); 2) многоквартирный жилой дом по адресу: г. Якутск, ул. Орджоникидзе, 56 (здание № 2).

Оба здания построены по I принципу использования многолетнемерзлых грунтов. Высота проветриваемого подполья здания № 1 – 2,270 м, имеет ограждение по периметру из профилированного листа по всей высоте. Здания № 2 – 1,780 м, имеет такое же ограждение по периметру здания с предусмотренным зазором от отмостки, равным 0,47 м (рис 1).

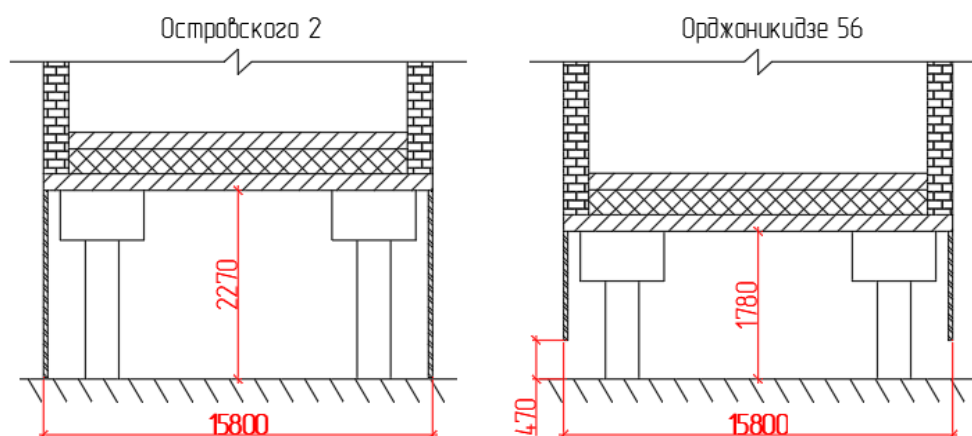


Рисунок 1. Схема конструкции проветриваемого подполья на объектах.

По данным натурных замеров (рис. 2) температура на глубине 9 метров в середине здания с закрытым подпольем на 0.12–1.95 °С выше, чем у здания с открытым подпольем. По результатам наблюдения за 2 года в здании с закрытым подпольем температура на глубине 10 метров повысилась на 0.81 °С.

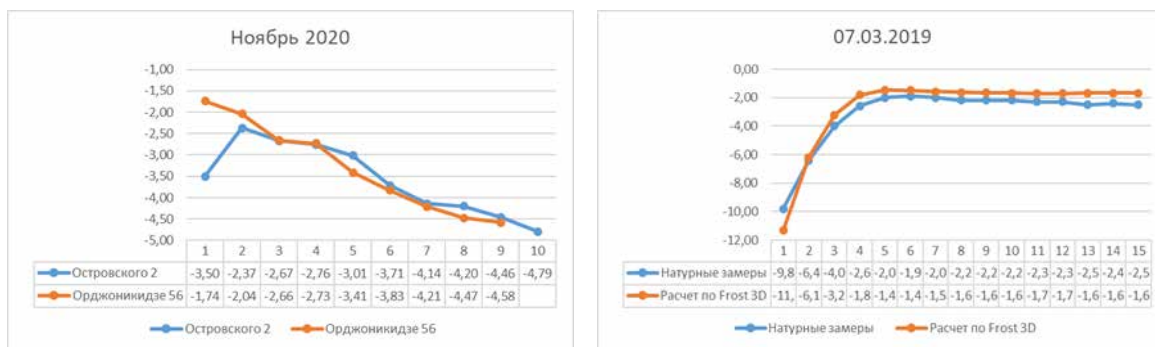


Рисунок 2. Результаты замеров температуры многолетнемерзлых грунтов.

Для оценки полученных результатов провели построение математической модели многолетнемерзлых грунтов эталонного здания при помощи программного комплекса Frost 3D. Исходными данными для расчета приняты инженерно-геологические изыскания и замеры температуры многолетнемерзлых грунтов на объекте «Многokвартирный жилой дом по адресу ул. Автодорожная, 5/1, стр. 3». Здание прямоугольное, имеет размеры в плане по осям 15м × 50 м и высоту проветриваемого подполья 2,1 м. Доступ в подполье ограничен металлическими решётками, что дает нам основания считать данное подполье находящимся в открытом состоянии. Климатические граничные условия для проведения расчета были приняты согласно данным многолетних наблюдений, полученных из баз данных.

Проведена верификация данных модели путем сравнения натуральных значений температуры грунтов с расчетными данными, разница составила в среднем 0,5 °С (рис. 3).

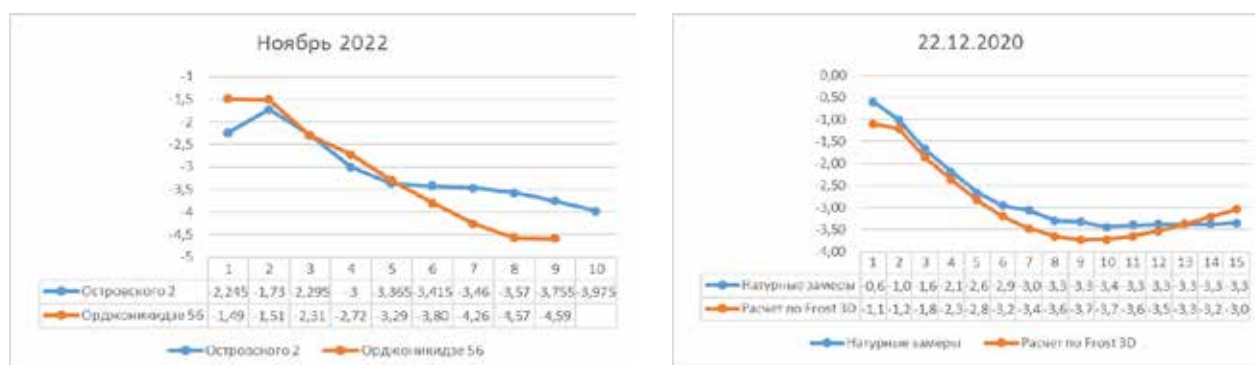


Рисунок 3. Верификация данных расчета математической модели.

На основе полученной математической модели построили прогноз изменения температурного режима грунтов для подполий, находящихся в открытом и закрытом состоянии (рис. 4). Закрытое состояние проветриваемого подполья смоделировали за счет минимизации скорости ветра на площади, занимаемой проветриваемым подпольем.

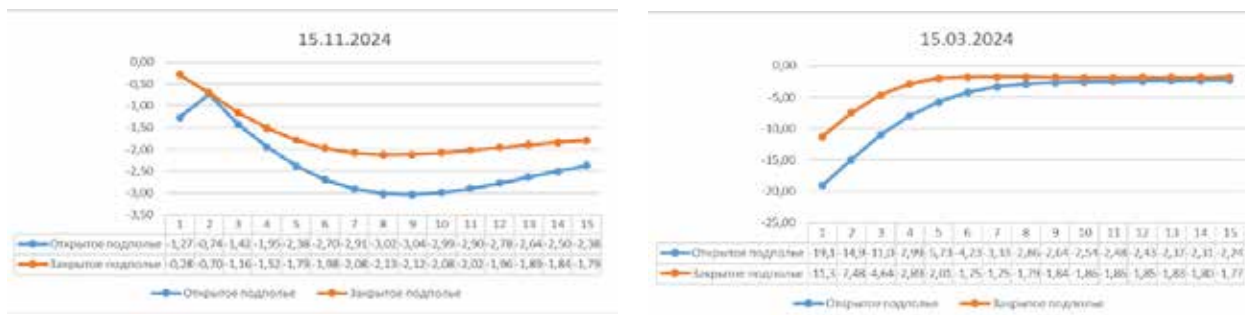


Рисунок 4. Прогнозные значения температур.

В результате проведенного прогнозного расчета объекта «Многоквартирный жилой дом по адресу ул. Автодорожная, 5/1, стр. 3» при закрытии проветриваемого подполья наблюдается повышение температуры на $1,0^{\circ}\text{C}$ на глубине 10 м.

По итогам проделанной работы получили следующие результаты:

1. Проведен мониторинг температуры многолетнемерзлых грунтов оснований зданий г. Якутска на свайном фундаменте с различными параметрами подполья. Температура многолетнемерзлых грунтов основания здания с закрытым подпольем на глубине 9 м выше на $0.12\text{--}1.95^{\circ}\text{C}$.

2. Построена математическая модель теплообмена в многолетнемерзлых грунтах основания при помощи программного комплекса Frost 3D с учетом параметров климата, теплофизических свойств грунтов основания, размеров и конфигурации здания. Отклонения температур, полученных в результате расчета, от температур, полученных по результатам фактических замеров в температурных трубках, составили 0.5°C .

3. Проведен расчет прогнозных значений температуры многолетнемерзлых грунтов основания зданий на свайных фундаментах с закрытым и открытым вариантом подполья. Температура многолетнемерзлых грунтов основания на глубине 10 м у здания с закрытым вариантом подполья выше в среднем на 1°C .

Литература

- ГОСТ 25358-2012. Грунты. Метод полевого определения температуры [Текст]. Взамен ГОСТ 25358-82; Введ. с 01.07.2013. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 16 с.
- Попов А.П. Технология геотехнического мониторинга в криолитозоне // Инженерные изыскания. – 2009. – 04. – С. 20–33.
- Порхаев Г.В., Щелков В.К. Прогнозирование температурного режима вечномерзлых грунтов на застраиваемых территориях. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1980. – 112 с., ил.
- Порхаев Г.В., Фельдман Т.М. Теплофизика промерзающих и протаивающих грунтов. – М: Наука, 1964. – 197с.
- СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*/ Минрегион России. – М., 2012.
- СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с изменением 1) / Росстандарт ФГУП Стандартинформ. – М., 2016.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕСУРСОВ

Г.П. Кузьмин*

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

**gpkuzmin@mpi.ysn.ru*

Аннотация. Кратко изложены способы и устройства для практического использования природных тепловых ресурсов. Приводится новая конструкция воздушного сезоннодействующего охлаждающего устройства (термосифона) с повышенной надежностью и охлаждающей способностью. Дано описание эффективного способа аккумулялирования холода атмосферного воздуха в массиве многолетнемерзлых грунтов для охлаждения подземных сооружений в теплое время года. Изложены способ и устройства аккумулялирования холода наружного воздуха в подземном резервуаре с водой для охлаждения жидкостей и газов. Представлены способ и устройства для отопления помещений в холодное время года и снижения воздействия морозного пучения на свайные фундаменты на основе использования теплоты фазовых переходов воды.

Ключевые слова: температура, теплота, воздух, вода, охлаждение, обогрев.

USE OF NATURAL THERMAL RESOURCES

G.P. Kuzmin*

Institute of Permafrost Science SB RAS, Yakutsk, Russia

**gpkuzmin@mpi.ysn.ru*

Annotation. Methods and devices for the practical use of natural thermal resources are briefly outlined. A new design of an air seasonal cooling device (thermosyphon) with increased reliability and cooling capacity is presented. A description is given of an effective method for accumulating the cold of atmospheric air in an array of permafrost soils for cooling underground structures in the warm season. The method and devices for accumulating cold outside air in an underground reservoir with water for cooling liquids and gases are described. A method and devices are presented for space heating in the cold season and for reducing the effect of frost heaving on pile foundations based on the use of the heat of water phase transitions.

Keywords: temperature, heat, air, water, cooling, heating.

В настоящее время криогенные ресурсы используются в основном в строительной и промышленной индустрии. Однако степень их использования находится на весьма низком уровне. Поэтому в современных условиях интенсивного освоения северных территорий проблеме использования криогенных ресурсов уделяется повышенное внимание ученых и практиков. Различные аспекты проблемы изучают во многих научно-исследовательских учреждениях, в том числе в ИМЗ СО РАН. Дано определение понятия и предложена схема классификации «криогенных строительных материалов» (Алексеев, Чжан, 2011). Предложены способы, разработаны и усовершенствованы устройства, позволяющие эффективно использовать природные тепловые ресурсы, которые прошли этап опытных и опытно-промышленных испытаний.

Воздушные охлаждающие устройства

Воздушный термосифон. Сезоннодействующие воздушные охлаждающие устройства (воздушные термосифоны) из-за низкой надежности практически не нашли применения. В летнее время в коаксиальных установках при наличии ветра теплый воздух всасывается в узкий межтрубный канал, где конденсированная влага намерзает на стенках канала и через определенное время неизбежно закупоривает его. Конструктивным способом обеспечено движение воздуха в термосифоне по направлению центральный – межтрубный – вытяжной

каналы (Кузьмин, 2002). При таком направлении движения воздуха лед образуется на стенках широкого центрального канала, а зимой интенсивно испаряется под действием сухого холодного воздуха. Экспериментами установлено, что воздушный и жидкостный термосифоны при работе в течение длительного зимнего периода охлаждают мерзлые грунты практически одинаково (Кузьмин, Чжан, 2004).

Воздушная охлаждающая система подземных сооружений. Охлаждение подземных сооружений, созданных в массиве многолетнемерзлых грунтов, осуществляется обычно нагнетанием холодного воздуха непосредственно в выработку. Такой способ охлаждения недостаточно эффективен вследствие ограниченности площади теплообменной поверхности и теплоемкости мерзлых грунтов. Для формирования более низких температур в подземных сооружениях в теплое время года разработан способ дополнительного аккумулирования холода атмосферного воздуха в верхней части массива многолетнемерзлых грунтов над сооружением (патент № 2621912, 2017). Разработанный способ дополнительного аккумулирования холода наружного воздуха используется для управления температурным режимом Федерального криохранилища семян растений в г. Якутске. Более 10 лет криохранилище успешно эксплуатируется впервые в мире без затрат «товарной» энергии и без применения нагнетательных механизмов.

Аккумуляция и использование теплоты фазовых переходов воды

Фазовые переходы воды сопровождаются, как известно, процессами поглощения и выделения тепла. Теплота фазовых переходов (ТФП) воды значительно больше ТФП многих других материалов. Так, удельная теплота плавления льда больше удельной теплоты плавления парафина в 2,23 раза, стали – почти в 4 раза. Кроме того, вода является существенно дешевым и экологически чистым материалом. ТФП воды позволяет получать в зависимости от необходимости холод или тепло.

Геокриогенный аккумулятор-охладитель. Устройство предназначено для охлаждения в летнее время жидкостей и газов до околонулевых положительных температур. В зимнее время с помощью воздушных термосифонов замораживают воду в подземном резервуаре, созданном в массиве многолетнемерзлых грунтов размывом мерзлых грунтов водой через буровую скважину (Кузьмин, 2002; Патент 2517844, 2014). В теплое время года включается водяная циркуляционная система, подающая холодную воду из резервуара в наземный теплообменник, из которого нагретая вода из теплообменника по сливному трубопроводу возвращается в резервуар. Устройство было испытано на летней ферме для охлаждения молока. Расход электричества для работы предложенного устройства по сравнению с расходом электричества для работы машинной холодильной установки сократился в 40 раз.

Круглогодичное охлаждающее устройство. Возведение геокриогенного охладителя (ГО) возможно специализированной строительной организацией, оснащенной комплексом достаточно сложного оборудования. Кроме того, ГО функционирует только в летнее время.

Для охлаждения продукции на мелких предприятиях разработано круглогодично действующее охлаждающее устройство (*патент 2785027, 2022*), в котором в зимнее время используется холод атмосферного воздуха, а в летнее время – аккумуляированный в воде холод также атмосферного воздуха.

В отличие от ГО, содержащего подземный резервуар, создаваемый размывом водой, круглогодично охлаждающее устройство имеет котлован, создаваемый в верхней части массива многолетнемерзлых грунтов землеройной техникой. Устройство не доведено до практического применения.

Отопление помещений. В холодное время года помещение обогревается теплотой фазового перехода воды до высоких отрицательных температур (*Кузьмин, Куваев, 2019; патент № 2617579, 2017*). Количество воды в аккумуляторах тепла определяются потерями тепла из помещения в окружающую среду и необходимой площадью теплообмена на границе вода–лед. Практическая возможность и эффективность такого способа отопления некоторых типов производственных помещений подтверждена результатами испытания опытного помещения в течение 4-х лет в климатических условиях г. Якутска.

Способ снижения воздействия морозного пучения на свайные фундаменты. Для районов развития сезонного промерзания разработан способ уменьшения пучинистости грунта вокруг сваи путем замедления процесса промерзания грунта нагреванием теплотой талого грунта (*патент 2320821, 2008*). Передача тепла из массива талого грунта в слой сезонного промерзания осуществляется с помощью известных сезоннодействующих охлаждающих устройств. Недостатки способа заключаются в ограниченности применения и в сложности и уязвимости теплопередающего устройства. Для применения способа замедления процесса промерзания грунта в зоне пучения как в условиях сезонного промерзания, так и в области распространения многолетнемерзлых грунтов нами предложен способ нагревания грунта в зоне пучения теплотой фазового перехода воды. Для этого верхняя часть полой сваи в пределах зоны пучения, ограниченная водонепроницаемой перегородкой, заполняется водой.

Литература

- Алексеев, В. П., Чжан, Р. В. Криогенные строительные материалы / В. П. Алексеев, Р. В. Чжан. – Якутск : Изд-во ФБГУН Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2011. – 68 с.
- Кузьмин, Г. П. Подземные сооружения в криолитозоне / Г. П. Кузьмин – Новосибирск : Наука, 2002. – 176 с.
- Кузьмин, Г. П., Куваев, В. А. Вода как аккумулятор солнечной энергии / Г. П. Кузьмин, В. А. Куваев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 9. – С. 80–84.

Кузьмин, Г. П., Чжан, Р. В. К вопросу обеспечения надежности и оценки охлаждающей способности воздушных термосифонов / Г. П. Кузьмин, Р. В. Чжан // Криосфера Земли. – 2004. –Т. VIII, № 1. – С. 74–78.

Кузьмин, Г. П., Панин, В. Н. Обеспечение оптимальной температуры в подземных хранилищах семян растений в условиях криолитозоны / Г. П. Кузьмин, В. Н. Панин // Труды десятой Международной конференции по мерзлотоведению. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Россия, 25–29 июня 2012 г., Т. 3. – Тюмень: ООО «Печатник», 2012. – С. 293–296.

Пат. 2320821, Российская Федерация. Способ замедления процесса сезонного промерзания / С. В. Остробородов, Г. П. Пустовойт, О. Л. Хариевский и др.; опубл. 24.03.2008.

Пат. 2517844 Российская Федерация, МПК F 25D A01J. Устройство теплообмена жидкостей и газов / Г. П. Кузьмин, Р. В. Чжан, А. В. Яковлев; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное Учреждение РАН – Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (RU). – № 2012129380; заявл. 11.07.2012; опубл. 20.01.2014, Бюл. № 2; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

Пат. 2617579 Российская Федерация, МПК F25D 3/00. Устройство для поддержания околонулевой температуры в закрытых помещениях. / Г. П. Кузьмин; Федеральное государственное бюджетное Учреждение РАН – Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (RU); опубл. 25.04.2017, Бюл. № 12. – 8 с.

Пат. 2621912 Российская Федерация, МПК F25D 1/00 (2006.01). Способ охлаждения подземных сооружений в массиве многолетнемерзлых горных пород и устройство для его осуществления / Г. П. Кузьмин, В. Н. Панин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное Учреждение РАН – Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (RU); опубл. 08.06.2017 г., Бюл. № 16. – 10 с.

Пат. 2785027 Российская Федерация, МПК F25D 1/00 (2006.01). Круглогодичное охлаждающее устройство на основе использования холодного наружного воздуха / Г. П. Кузьмин, В. А. Куваев; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное Учреждение РАН – Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (RU); опубл. 02.12.2022, Бюл. № 34. – 9 с.

ОТОПЛЕНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ ВОДОЙ

Г.П. Кузьмин, В.А. Куваев*

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

**Levchik_47@mail.ru*

Аннотация. Вода, как теплоаккумулирующий материал, может найти применение для отопления некоторых видов производственных помещений, в которых допускается высокая отрицательная температура, близкая к 0 °С. В течение 5,5 лет в г. Якутске проводятся испытания опытного помещения, отапливаемого теплотой фазового перехода воды. Приведены размеры и устройство ограждающих конструкций опытного помещения, параметры аккумулятора тепла и объем воды в аккумуляторе. Представлены основные результаты длительного испытания опытного объекта, подтвердившие практическую возможность использования воды для отопления помещений в зимнее время в весьма суровых климатических условиях.

Ключевые слова: вода, теплота, аккумулярование, выделение, отопление, помещение.

HEATING OF PREMISES WITH WATER

G.P. Kuzmin, V.A. Kuvaev*

Institute of Permafrost Science SB RAS, Yakutsk, Russia

**Levchik_47@mail.ru*

Abstract. Water as a heat-accumulating material can be used for heating some types of industrial premises in which a high negative temperature close to 0C is allowed. For 5.5 years in Yakutsk, tests of an experimental room heated by the heat of the phase transition of water have been carried out. The dimensions and arrangement of the enclosing structures of the experimental room, the parameters of the heat accumulator and the volume of water in the accumulator are given. The main results of the long-term testing of the experimental facility are presented, which confirmed the practical possibility of using water for heating premises in winter in very harsh climatic conditions.

Keywords: water, heat, battery, temperature heating, room.

Вода, как известно, при переходе из твердого состояния в жидкое аккумулирует из окружающей среды определенное количество теплоты, а при переходе из жидкого состояния

в твердое выделяет такое же количество теплоты. Теплота фазовых переходов воды превышает теплоту фазовых переходов многих других веществ. Так, например, удельная теплота плавления (УТП) льда (335 кДж/кг) превышает УТП парафина (150 кДж/кг) в 2,3 раза, стали (84 кДж/кг) – в 4 раза. Свойство воды аккумулировать и выделять значительное количество теплоты при фазовых переходах обуславливает возможность использования ее при создании как охлаждающих устройств (Кузьмин 2002; Патент...), так и обогревательного оборудования (Патент «Устройство для стабилизации ...»; Патент «Устройство для поддержания...», 2017).

На территориях с продолжительным холодным периодом года на отопление помещений расходуется огромное количество теплоты. В таких климатических условиях отопление некоторых производственных помещений, в которых в зимнее время допускается высокая отрицательная температура, близкая к 0°C , может производиться теплотой фазового перехода воды. В летнее время при таянии льда в воде аккумулируется необходимое количество теплоты, которая в зимнее время в процессе замерзания воды выделяется и обогревает помещение. Необходимое количество воды в аккумуляторах для отопления помещений зависит от климатических условий, размеров и термического сопротивления ограждающих конструкций помещения и условий его эксплуатации и определяется потерями тепла из помещения в окружающую среду в зимнее время.

В течение 5,5 лет проводятся испытания опытного помещения, отапливаемого теплотой фазового перехода воды в климатических условиях г. Якутска. Опытное помещение представляет собой гараж размером 9,0 x 12,0 x 3,5 м. Металлические каркасные стены и потолок гаража покрыты листами пенопласта толщиной 35 см. Водяные аккумуляторы в количестве 8 штук шириной 1,5 м и суммарной длиной 22 м установлены вдоль стен гаража. Суммарное количество воды в аккумуляторах составляет около 50 м^3 .

В период испытания опытного объекта температура наружного воздуха опускалась до -45°C , кратковременно до -50°C и ниже, а средняя температура воздуха в гараже составила минус 3-4 $^{\circ}\text{C}$.

Затраты на оборудование и эксплуатацию водяного отопления помещения складываются из расходов на материалы и изготовление металлических емкостей, заполнение их водой и восполнение испарившейся части воды в аккумуляторах один раз в год.

Водяные аккумуляторы тепла могут применяться для обогрева стояночных гаражей, ангаров, прогулочных и спортивных помещений, хранилищ некоторых видов продуктов и т.д. Актуальным является строительство простейших станций на протяженных автомобильных дорогах, состоящих из гаража, обогреваемого теплотой фазового перехода

воды, помещения для отдыха водителей, отапливаемого дровами или различными углеводородами, и автономного источника электроэнергии для бытовых нужд и выполнения ремонтных работ.

Практическая возможность и экономическая целесообразность отопления определенных видов помещений теплотой фазового перехода воды подтверждена длительными испытаниями опытного объекта в суровых климатических условиях.

Литература

- Кузьмин Г.П. Подземные сооружения в криолитозоне. – Новосибирск: Наука, 2002. – 176 с.
Патент 2517844 РФ. «Устройство теплообмена жидкости и газов».
Патент 112219 РФ. «Устройство для стабилизации температуры в закрытых помещениях».
Патент 2617579 «Устройство для поддержания околонулевой отрицательной температуры в закрытых помещениях». – Опубл. 25.04.2017 г.

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ СПОСОБ ЗАЩИТЫ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ОТ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ

Г.П. Кузьмин, А.Д. Набережный*

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

**artemon2003@inbox.ru*

Аннотация. Известен способ снижения воздействия морозного пучения на свайные фундаменты путем замедления процесса промерзания грунта в зоне пучения нагреванием теплотой талого грунта, залегающего ниже слоя сезонного промерзания. Показаны устройство и работа теплопередающей установки из талой зоны в слой сезонного промерзания. Изложен механизм снижения воздействия морозного пучения на свайные фундаменты. Указаны недостатки способа, основным из них является возможность применения только в области сезонного промерзания. Предложен способ замедления процесса промерзания грунта в зоне пучения на основе использования теплоты фазового перехода воды, позволяющий снижать воздействие морозного пучения на свайные фундаменты и в районах сезонного промерзания, и в области распространения многолетнемерзлых грунтов, а также избежать и других недостатков известного способа. Приведено устройство для осуществления способа.

Ключевые слова: пучение, свая, температура, теплота, смерзание, вода.

THERMAL ENGINEERING METHOD OF PROTECTING PILE FOUNDATIONS FROM FROST HEAVING

G.P. Kuzmin, A.D. Naberegnii*

1– Institute of Permafrost Science SB RAS, Yakutsk, Russia

**artemon2003@inbox.ru*

Annotation. A method is known to reduce the impact of frost heaving on pile foundations by slowing down the process of soil freezing in the heaving zone by heating the heat of thawed soil lying below the layer of seasonal freezing. The device and operation of the heat transfer unit from the melt zone to the seasonal freezing layer are shown. The mechanism of reducing the impact of frost heaving on pile foundations is described. The disadvantages of the method are indicated, the main one is the possibility of using only in the field of seasonal freezing. A method is proposed to slow down the process of soil freezing in the heave zone based on the use of the heat of the phase transition of water, which allows to reduce the impact of frost heave on pile foundations both in areas of seasonal freezing and in the area of permafrost distribution, as well as to avoid other disadvantages of the known method. A device for implementing the method is given.

Keywords: heaving, pile, temperature, heat, freezing, water.

Морозное пучение грунтов создает проблемы при эксплуатации малонагруженных зданий и сооружений как в области распространения многолетнемерзлых грунтов, так и в районах сезонного промерзания.

Для снижения воздействия морозного пучения на свайные фундаменты разработан способ (*Патент...2008*), основанный на замедлении процесса сезонного промерзания окружающего фундамент грунта путем нагревания с помощью сезонно-действующих устройств, обычно применяемого для охлаждения и замораживания грунта, с размещением испарителя в талых грунтах ниже глубины сезонного промерзания, а конденсатора – в слое сезонного промерзания. В результате искусственного замедления процесса сезонного промерзания грунта происходит миграция влаги из талой части грунта к фронту промерзания, снижая пучинистость, а поддержание более высокой температуры стенки сваи и прилегающего промерзшего слоя грунта по сравнению с температурой их при естественном промерзании уменьшает силы смерзания грунта с поверхностью фундамента.

Недостатками способа являются:

- трудоемкость и высокая стоимость изготовления теплоаккумулирующего устройства;
- высокая вероятность повреждения конденсатора и соединительных теплопроводов, расположенных в зоне периодического промерзания и оттаивания грунтов;
- возможность применения способа для защиты свайных фундаментов от морозного пучения только в районах развития сезонного промерзания грунтов, т.е. при наличии естественного источника тепла.

Целью предлагаемого решения является устранение указанных недостатков известного способа, которое достигается использованием в качестве источника тепла для замедления процесса как сезонного промерзания, так и сезонного оттаивания пресной воды, выделяющей при замерзании значительное количество тепла. Такое решение можно осуществить (рис. 1) при применении полой металлической сваи 1 или составной сваи с полой верхней частью в слое сезонного промерзания или сезонного оттаивания 8.

Полость, образованную стенками сваи и прочной водонепроницаемой перегородкой 7, устраиваемой на уровне границы сезонного промерзания или сезонного оттаивания, заполняют пресной водой до уровня поверхности земли 4 через заправочный штуцер 10, расположенный на стенке надземного участка сваи. Необходимый уровень воды в полости поддерживают с помощью контрольного штуцера 9, расположенного на стенке сваи на уровне поверхности земли.

После установления отрицательных температур наружного воздуха в процессе кристаллизации воды 5 в полости, выделяемая теплота фазового перехода по стенкам металлической сваи, обладающей высокой теплопроводностью, непрерывно поступает в

о окружающие фундамент грунты. Замедление в результате этого процесса промерзания грунта вокруг сваи приводит в конечном итоге к снижению пучинистости слоя грунта, прилегающего к поверхности фундамента. Нагревание замерзшей части грунта теплотой фазового перехода воды уменьшает силы смерзания грунта с боковой поверхностью сваи. В летнее время в процессе таяния льда 3 в полости в результате поглощения тепла из окружающего сваю грунта несущая способность мерзлых грунтов основания свайного фундамента поддерживается на более высоком уровне, чем при естественном протаивании. Для уменьшения потерь тепла из полости в холодное время года и притока тепла в полость в летнее время надземную часть сваи покрывают теплоизоляционным материалом 2.

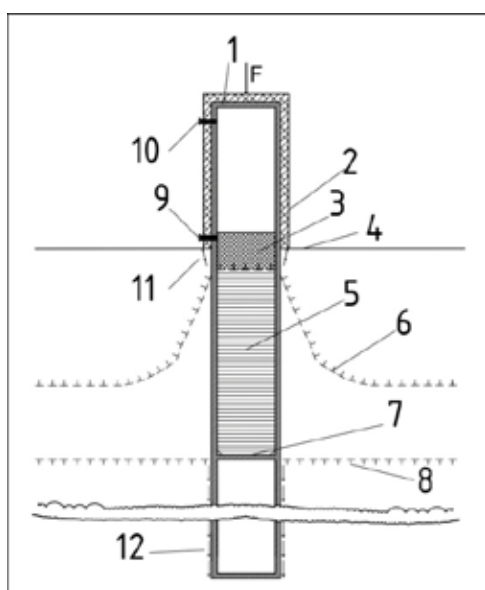


Рисунок 1. Устройство для снижения воздействия морозного пучения на свайные фундаменты:
 1 – полая свая; 2 – теплоизоляция; 3 – лед; 4 – поверхность земли; 5 – вода; 6 – граница замерзания воды и грунта; 7 – перегородка; 8 – промерзающий или сезоннооттаивающий слой;
 9 – контрольный штуцер; 10 – заправочный штуцер; 11 – место приложения касательных сил пучения; 12 – место приложения сил смерзания сваи с мерзлым грунтом в период замерзания.

Таким образом, применение предложенного способа уменьшения воздействия морозного пучения на свайные фундаменты физически обосновано. Дальнейшие исследования будут направлены на установление закономерностей степени повышения устойчивости свайных фундаментов на пучинистых грунтах при применении предлагаемого способа.

Литература

Патент 2320821 РФ. Способ замедления процесса сезонного промерзания. Опубл.27.03.2008.

НОВЫЕ СПОСОБЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Е.Ю. Локтионов^{1,2*}, Е.С. Шарборова^{2,3}, А.В. Клоков^{1,2}, А.С. Тутунин²

1 – Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия

2 – Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

3 – Федеральная политехническая школа (EPFL), Лозанна, Швейцария

** eloktionov@mail.ru*

Аннотация. Непредсказуемое изменение климата требует пересмотра традиционных подходов к термостабилизации грунтов в основании зданий и сооружений. Поэтому в последнее время резко возросло число систем с холодильными машинами. В настоящее время абсолютное большинство таких систем используют для работы энергию ископаемого топлива. Расчеты показывают, что в качестве источника вполне можно использовать солнечную энергию, поскольку она требуется в теплое время года, когда ее выработка высока. При этом высокая тепловая инерция грунта сгладит любые нестабильности генерации. В данном докладе приведены расчетные и экспериментальные примеры реализации систем термостабилизации линейных (автозимники) и площадных инфраструктурных объектов, мерзлотников, береговых обрывов, грунтов между нефтегазодобывающими скважинами с использованием тепловых насосов, питаемых от солнечных батарей, а также утилизации отводимого из грунта тепла для овощеводства.

Ключевые слова: термостабилизация грунтов, тепловые насосы, солнечные батареи, грунтовые зонды.

THE NEW WAYS OF PERMAFROST THERMAL STABILISATION USING RENEWABLE ENERGY

E. Yu. Loktionov^{1,2*}, E. S. Sharaborova^{2,3}, A. V. Klokov^{1,2}, A. S. Tutunin²

1 – Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

2 – Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

3 – Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland

** eloktionov@mail.ru*

Abstract. Unpredictable climate change requires a revision of traditional approaches to thermal stabilization of soils at buildings and structures foundations. Therefore, the number of systems with refrigerating machines has increased dramatically recently. Currently, the vast majority of such systems use fossil fuel energy for operation. Calculations show that it is quite possible to use solar energy as a source, since it is required in the warm season, when its production is high. At the same time, the high thermal inertia of the soil will smooth out any generation instabilities. This report provides examples of calculated and experimental examples of the implementation of thermal stabilization systems for linear (ice roads) and areal infrastructure facilities, ice cellars, coastal cliffs, ground between oil and gas producing wells using heat pumps powered by solar panels, as well as utilization of heat diverted from the ground for horticulture.

Keywords: soil thermal stabilization, heat pumps, solar panels, ground probes.

Различные сценарии изменения климата предполагают достаточно значительный разброс температур. Эффект арктического усиления может сделать этот разброс еще большим. При строительстве новых и реконструкции существующих объектов в криолитозоне необходимо принимать во внимание изменения климата как минимум в 30-летней перспективе при разработке мер по термостабилизации грунтов в основании зданий и сооружений.

В настоящее время известно множество примеров того, как системы термостабилизации, работающие на нерасчетных вследствие глобального потепления режимах, перестают справляться со своей задачей. Низкое качество изысканий, проектирования и выполнения строительно-монтажных работ только усугубляет проблемы с

термостабилизацией, расчет которой чаще всего выполняется без учета уже очевидных климатических изменений, не отраженных в строительных нормах.

Пассивные системы, использующие теплоизоляцию поверхности или солнцезащитные козырьки, при наличии положительного тренда температуры воздуха не смогут предотвратить возникновение такого же тренда температуры грунта в долгосрочной перспективе. Наиболее распространенные сейчас СОУ для компенсации возрастающей тепловой нагрузки необходимо устанавливать в большем количестве, что на начальном этапе может привести к избыточному пучению грунта. Все чаще на аварийных и особо опасных объектах начинают использовать холодильные машины, затраты на эксплуатацию которых все равно меньше возможного ущерба, как наглядно показала катастрофа в Норильске 29 мая 2020 г.

Основной вклад в растепление грунтов вносит солнечное излучение, вследствие как прямого поглощения его поверхностью, так и при теплопередаче конвекцией от нагреваемого им же воздуха. При этом солнечная энергия могла бы быть использована для холодильных машин, охлаждающих грунт (*Loktionov et al., 2022*). Солнечная энергия может также быть использована для привода механизма сезонного перемещения теплоизоляции (*Шараборова, Локтионов, 2022*). Известны опасения относительно использования солнечной энергетики вообще и в Арктике в частности: полярная ночь, низкая инсоляция на горизонтальной поверхности, нестабильность генерации, суровые климатические условия. Такой системе не надо работать полярной ночью, поскольку достаточно естественного холода. Грунт является огромным и бесплатным накопителем энергии, сглаживающим любую нестабильность генерации. В суровых климатических условиях Тазовского п-ова на ок. 100 объектах управления телемеханикой скважин ООО «Газпром добыча Ямбург» с 2005 г. не было ни одного отказа солнечных батарей!

С использованием программного комплекса для моделирования теплового состояния грунтов Frost 3D провели расчеты эффекта предлагаемой системы при охлаждении грунта горизонтальными зондами мелкого залегания (создание запирающего проникновение тепла вглубь слоя) на примере автозимников (принципиально, их можно сделать таким образом круглогодичными, (рис. 1, а)); вертикальными зондами на всю глубину многолетнемерзлых пород для предотвращения слияния ореолов протаивания между нефте- и газодобывающими скважинами (можно уменьшить расстояние между ними хоть до 5 м (рис. 1, в) (*Локтионов 2022*)); мерзлотников (ледников) при охлаждении воздуха внутри них (заодно способствует лучше сохранности продуктов (рис. 1, б)); комбинированных грунтовых зондов для термостабилизации береговых обрывов (рис. , г). Была также проведена экспериментальная проверка предлагаемого подхода (*Sharaborova et al., 2022*) не только с точки зрения

термостабилизации грунта, но и утилизации отводимого из него тепла (в Архангельской области получен удвоенный урожай огурцов и помидоров).

Применимость предлагаемого способа показана для всей криолитозоны. Стоимость его реализации сопоставима с существующими способами, но в отличие от них, возможна окупаемость за счет реализации электрической и тепловой энергии.

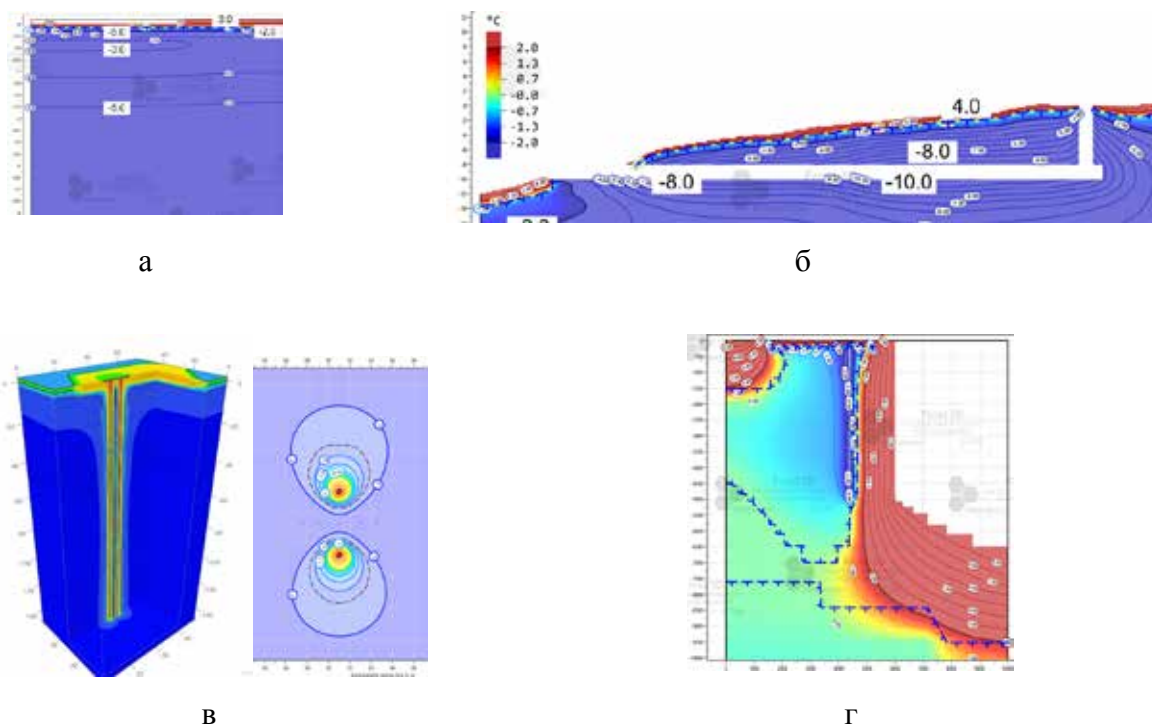


Рисунок 1. Примеры реализации предлагаемого способа термостабилизации для: а – автотрассы, б – мерзлотника, в – грунта между эксплуатационными скважинами, г – берегового обрыва.

Работа выполнена при поддержке РНФ и Архангельской области (грант 22-19-20026). Авторы благодарят ООО НТЦ Симмэйкерс за предоставление бесплатной академической лицензии на программный комплекс для геотехнических расчетов Frost 3D.

Литература

Пат. 2789556 Российская Федерация, МПК E21B 36/00. Способ предотвращения слияния ореолов протаивания вокруг скважин в многолетнемерзлых породах / Е. Ю. Локтионов ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Пермафрост»; опубл. 06.02.2023, Бюл. № 4. – 10 с.

Пат. 2779706 Российская Федерация, МПК E02D 3/115. Способ термостабилизации грунта за счет круглогодичного регулирования теплопередачи / Е. С. Шараторова, Е. Ю. Локтионов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Пермафрост»; опубл. 12.09.2022, Бюл. № 26. – 10 с.

Loktionov, E. Y., Sharaborova, E. S., Shepitko, T. V. A Sustainable Concept for Permafrost Thermal Stabilization // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – Vol. 52. – 2022. – P. 102003.

Sharaborova, E. S., Shepitko, T. V., Loktionov, E. Y. Experimental Proof of a Solar-Powered Heat Pump System for Soil Thermal Stabilization // Energies. – Vol. 15, no. 6. – 2022. – P. 2118.

УСТОЙЧИВОСТЬ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

М.И. Лоскин*

*ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет»,
г. Якутск, Россия*

** melio_lmi@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрено влияние изменения климата на состояние гидромелиоративных объектов в Якутии. Установлено, что в последние годы, в связи с глобальным потеплением климата, наблюдается повышение средней годовой температуры воздуха и увеличение количества атмосферных осадков, что привело с начала 2000-х годов к увеличению водности малых рек, разрушениям гидромелиоративных объектов в Центральной Якутии. Приведенные факты чрезвычайных ситуаций на гидромелиоративных объектах и геосистемах подтверждают отрицательное влияние изменения климата на устойчивость существующих гидромелиоративных объектов и потребность в пересмотре их инженерно-технических характеристик, а также во внедрении комплекса климатоадаптивных мероприятий.

Ключевые слова: изменение климата, устойчивость гидромелиоративных объектов, половодье реки.

STABILITY OF HYDROMELIORATIVE OBJECTS REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA) IN CONDITIONS OF CLIMATE CHANGE

M.I. Loskin*

*State Federal-Funded Educational Institution of Higher Professional Training «Arctic State
Agrotechnological University (ASAU)», Yakutsk, Russia*

** melio_lmi@mail.ru*

Abstract. The influence of climate change on the state of irrigation and drainage facilities in Yakutia is considered. It has been established that in recent years, due to global warming, there has been an increase in the average annual air temperature and an increase in the amount of precipitation, which, since the beginning of the 2000s, has led to an increase in the water content of small rivers and the destruction of hydro-reclamation facilities in Central Yakutia. The above facts of emergency situations at hydro-reclamation facilities and geosystems confirm the negative impact of climate change on the stability of existing hydro-reclamation facilities and the need to revise their engineering and technical characteristics, as well as to introduce a set of climate-adaptive measures.

Keywords: climate change, stability of hydromeliorative objects, flood river.

В Республике Саха (Якутия), занимающей 1/6 часть Российской Федерации, более 90 % территории расположено на многолетнемерзлых грунтах. Жизнедеятельность территорий напрямую зависит от состояния водообеспеченности отраслей народного хозяйства, в первую очередь связанных с обеспечением продовольственной безопасности. В условиях реализации стратегических направлений развития сельского хозяйства Республики Саха (Якутия), повышения уровня и качества жизни в сельской местности, важнейшей задачей становится более рациональное использование земель сельскохозяйственного назначения, которое, учитывая суровые климатические условия, географическую неоднородность обширной территории, невозможно без проведения мелиоративных мероприятий (Лоскин, 2021). Для решения проблем водообеспечения в 1970–80-х годах в Якутии вдоль русел малых рек были построены системы гидромелиоративных объектов, обеспечивающих водными ресурсами сельские населенные пункты, сельскохозяйственное производство, гидромелиоративные мероприятия в 23 улусах республики. Объем накопленной воды в водохранилищах составил: 9 водохранилищ объемом более 5,0 млн м³,

120 – от 1,0 до 5,0 млн м³ и 61 – менее 1,0 млн м³. В соответствии с критериями классификации гидротехнические сооружения относятся к сооружениям III и IV класса.

В Якутии в последние годы в связи с глобальным потеплением климата наблюдается повышение средней годовой температуры воздуха и увеличение количества атмосферных осадков (Балобаев, 2012). Это обстоятельство стало фактором, значительно ухудшающим режим эксплуатации таких объектов, т.к. грунты, слагающие плотины, стали переходить из мерзлого состояния в талое (Чжан, 2002). Поэтому повышение устойчивости гидромелиоративных объектов, построенных в криолитозоне, становится одним из актуальных вопросов водоснабжения населенных пунктов и сельскохозяйственного производства.

С начала 2000-х годов на малых реках центральной части республики начали наблюдаться непредвиденные катастрофические объемы весеннего половодья и летне-осенних паводков. Для всестороннего обсуждения проблем, связанных с регулированием стоков малых рек, в целях рационального и эффективного использования их водных запасов, в марте 2005 года в с. Ытык-Кель Таттинского района была проведена научно-практическая конференция «Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений, минимизация вредного воздействия вод в период прохождения паводков на малых реках и повышения эффективности их долин». Данное мероприятие было одной из первых публичных площадок, на которой существенное потепление климата рассматривалось как одно из основных причин изменения гидрологических режимов малых рек (Материалы..., 2006). Если рассматривать аварийные ситуации на гидромелиоративных объектах начала 2000-х годов, то практически все они связаны с непредвиденными объемами паводковых вод, которые существенно превышали принятые при проектировании гидрологические параметры малых рек, а также с деградацией многолетнемерзлых пород, слагающих основания сооружений.

Так, в 2007 г. во время прохождения весеннего половодья по р. Татта был на 90 % подтоплен административный центр Таттинского района – село Ытык-Кель с населением более 6 тыс. чел. Основными причинами подтопления являлись, во-первых, непредвиденный в то время расход весеннего половодья по р. Татта – 120 м³/сек (Отчет... , 2006) тогда как все гидротехнические сооружения, а также правила землепользования и застройки населенного пункта были рассчитаны на пропуск 62,9 м³/сек (Материалы..., 2006); во-вторых, захламленность русла реки за населенным пунктом, затрудняющая пропуск паводковых вод до устьевой части. При этом необходимо иметь ввиду, что объем воды только по притоку р. Дебгэнэ составлял 107 м³/сек.

В июле 2014 г. вследствие обильных дождей, превышающих более чем в 4 раза среднедекадную норму, произошел перелив с последующим разрушением через грунтовую плотину «Сири-Холлогос» с пропускной способностью водосброса 22,4 м³/сек. В результате на 75 % было подтоплено с. Дябыла Чурапчинского района с населением более 1000 чел.

В мае 2018 г. произошла авария на гидротехническом сооружении водохранилища «Куогалы» с. Чурапча с населением более 10 тыс. человек. Причинами аварии была термокарстовая просадка основания плотины из-за деградации повторно-жильных льдов, подстилающих сооружение и четырехкратное увеличение среднедекадных атмосферных осадков (*Справка..., 2018*).

Таким образом, приведенные за последние 15 лет факты чрезвычайных ситуаций на гидромелиоративных объектах Якутии наглядно показывают отрицательное влияние изменения климата на устойчивость гидроузлов. Это обстоятельство требует пересмотра нормативных документов по проектированию, строительству и эксплуатации гидроузлов мелиоративного назначения и разработки комплекса климатоадаптивных мероприятий.

Литература

- Балобаев, В. Т. Прогноз изменения климата и мощности мерзлых пород в Центральной Якутии до 2200 г. / В. Т. Балобаев, Ю. Б. Скачков, Н. И. Шендер // География и природные ресурсы. – 2009. – № 2. – С. 50–55.
- Лоскин, М. И. Мелиорация сельскохозяйственных земель в Республике Саха (Якутия) в условиях изменения климата / М. И. Лоскин // Природообустройство. – 2021. – № 5 – С. 14–20.
- Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений, минимизация вредного воздействия вод в период прохождения паводков на малых реках и повышения эффективности их долин : материалы научно-практической конференции. – Якутск : Изд. «Сайдам», 2006. – С. 56.
- Отчет о научно-исследовательской работе «Расчет стока водосборного бассейна р. Таатта Республики Саха (Якутия)» / руководитель НИР к. т. н. А. И. Кузьмин; Омский филиал ФГУП СибНИИГиМ, кафедра гидрогеологии, гидравлики и инженерной гидрологии ФГОУ ВПО ОмГАУ. – Омск, 2006. – С. 51.
- Справка ФГБУ «Якутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», № 20/1-60-194 от 22.05.2018 г. – Якутск, 2018. – 1 с.
- Чжан, Р. В. Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне / Р. В. Чжан. – Якутск : Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2002. – 208 с.

МЕТОД ЕСТЕСТВЕННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

С.Ю. Малышков*, В.Ф. Гордеев, В.И. Поливач

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН), г. Томск, Россия

* msergey@imces.ru

Аннотация. В работе приведены результаты научно-исследовательских работ, показывающие перспективность метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли для картирования элементов экзогенной геодинамики и мониторинга криогенных процессов. В отличие от ранее применяемых для решения подобных задач геофизических методов, основанных на измерении электрических и магнитных свойств мерзлых пород, впервые применен метод, основанный на определении структурных, прочностных и деформационных свойств горных пород.

Ключевые слова: геодинамика; мониторинг; прогноз.

METHOD OF NATURAL PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE EARTH FOR ENGINEERING SURVEYS IN THE ENVIRONMENT OF THE FAR NORTH

S.Yu. Malyshkov*, V.F. Gordeev, V.I. Polivach

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS), Tomsk, Russia

** msergey@imces.ru*

Abstract. The paper presents the results of research works, showing the prospects of the method of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth for mapping the elements of exogenous geodynamics and monitoring cryogenic processes. In contrast to the geophysical methods previously used to solve such problems, based on measuring the electrical and magnetic properties of frozen rocks, a method based on determining the structural, strength, and deformation properties of rocks has been applied for the first time.

Keywords: geodynamics; monitoring; forecast.

В настоящее время метод естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) включен в список методов, рекомендованных для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород, решения задач определения местоположения, глубины залегания и формы локальных неоднородностей, зон трещиноватости и тектонических нарушений, оценки их современной активности в нормативно разрешительную документацию для проведения инженерных изысканий (СП-11-105-97). В том числе в часть IV – Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Но если в части проведения работ по оползням и тектоническим нарушениям уже созданы и интенсивно развиваются технологии изысканий (Гордеев и др., 2021; Кузьменко и др., 2016; Маслов и др., 1983), то для решения геокриологических задач метод до настоящего времени не используется.

Метод ЕИЭМПЗ основан на явлении электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) – способности диэлектрических материалов излучать электромагнитные сигналы при воздействии на них. ЭМЭ в горных породах может возникать при пьезоэлектрических эффектах, в процессе образования и релаксации зарядов на плоскостях трещин при изменении напряженного состояния массива горных пород, при изменении сплошности материалов-диэлектриков, при разрыве заполненных электролитом капилляров.

При фазовых переходах воды ЭМЭ была обнаружена достаточно давно (Гудзенко и др., 1985). Авторы это явление связали с электрическими разрядами между бортами микротрещин вследствие флуктуации давления на фронте кристаллизации. В работе (Шибков и др., 1988) показано, что часть импульсов ЭМЭ непосредственно связаны с кинетикой фазового превращения и отражают его нестационарность на мезоскопическом структурном уровне, а другая часть импульсов обусловлена развитием ростовых трещин. Непрерывная составляющая ЭМЭ в виде шума, по-видимому, обусловлена суперпозицией большого числа стохастических событий кристаллизации на микроуровне, связанных с динамикой микроскопических ступенек роста, флуктуациями фронта кристаллизации и т. д.

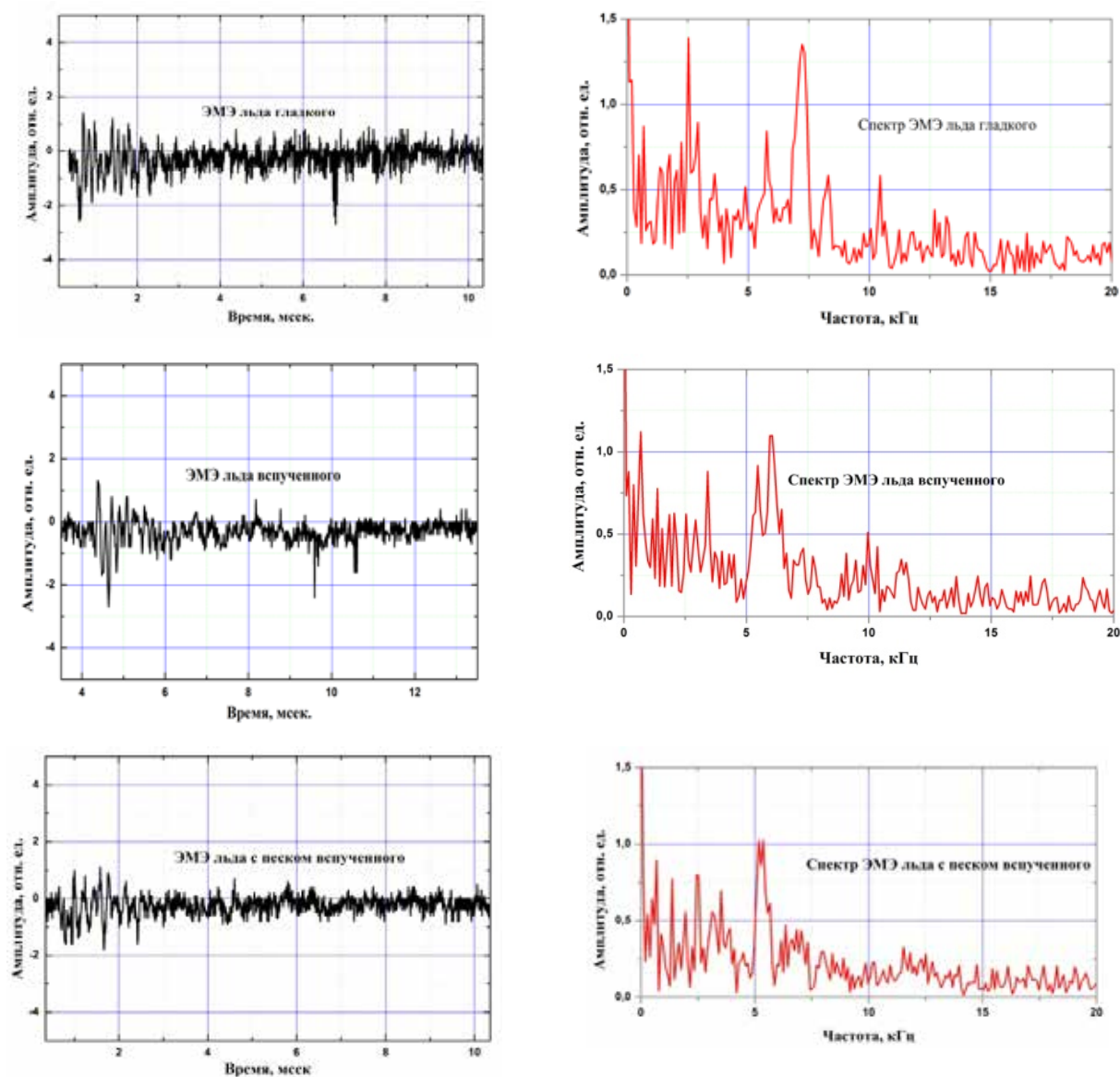


Рисунок 1. Характеристики электромагнитного отклика льда различной структуры на ударное воздействие.

Наши первые исследования оценки физико-механических свойств льда по сигналам ЭМЭ ставились в конце прошлого века при выполнении НИР по оценке несущей способности ледовых переправ. Для воздействия на лед использовался механический ударник с нормированным ударом. Электромагнитный отклик на ударное воздействие принимался дифференциальным емкостным датчиком электрического поля. Такой тип датчика позволяет принимать электромагнитный сигнал исключительно в ближней зоне приема. Результаты исследований показали, что сигнал ЭМЭ зависит от свойств льда (рис. 1). Меняется как амплитуда, так и спектральные составляющие сигнала. В дальнейшем эти исследования позволили предложить метод определения прочности льда по его электромагнитному отклику на механическое воздействие. Для изучения свойств ММГ в условиях естественного залегания и криогенных процессов методами, основанными на

явлении ЭМЭ не обязательно искусственно воздействовать на грунты. На горные породы непрерывно действуют лунно-солнечные приливные силы, атмосферные изменения, сейсмические и тектонические процессы (Малышков, Малышков, 2009), техногенная нагрузка и т.д. Достаточно принимать электромагнитный отклик земной коры на эти воздействия. Литосферную составляющую ЭМЭ горных пород в условиях естественного залегания принято называть ЕИЭМПЗ (СП-11-105-97). Результаты НИР с целью проверки возможности картирования элементов экзогенной геодинамики в условиях ММГ проводилась на Чаяндинском нефтегазоконденсатном месторождении в Якутии. В районе исследований площадь развития мерзлых грунтов достигает более 60 %. Наибольшая мощность мерзлой зоны на равнинах и плато составляет 100–250 м. Работы (Малышков и др., 2021) показали высокую перспективность метода ЕИЭМПЗ для картирования структур экзогенной геодинамики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской академии наук в рамках государственного задания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, проект № FWRG-2021-0008.

Литература

- Гудзенко О.И., Лапшин А.И., Косотуров А.В., Трохан А.М. Электромагнитное излучение, возникающее при замораживании жидкостей // Журн. техн. физики. – 1985. – Т. 55, № 3. – С. 612–614.
- Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю., Крутиков В. А., Поливач В. И., Кабанов М. М., Капустин С. Н., Шталин С. Г., Пустовалов К. Н. Развитие пассивной радиоволновой информационно-измерительной технологии мониторинга динамических процессов взаимодействия литосферы, криосферы и атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35, № 02. – С. 105–109. DOI: 10.15372/AOO20220204.
- Кузьменко Э. Д. и др. Эффективность метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли в задаче мониторинга оползневых процессов на склонах Киевского водохранилища // Геодинамика. – 2016. – 2 (21).
- Малышков Ю. П., Малышков С. Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра земли // Геология и геофизика. – 2009. – № 2. – С. 152–172.
- Малышков С.Ю., Гордеев В.Ф., Поливач В.И., Крутиков В.А. Прогноз экзогенных процессов методом естественного импульсного электромагнитного поля Земли // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике / Под ред. В.П. Мельникова и М.Р. Садуртдинова. – Салехард, 2021. – 498 с.
- Мастов Ш.Р., Саломатин В.Н., Яворович Л.В. Выявление степени деформации участков оползня методом регистрации импульсов электромагнитного поля // Инженерная геология. – 1983. – № 2. – С. 98–101.
- СП-11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. – Госстрой России, ГУП ЦПП. – 2001.
- Шибков, 1998 А.А. Шибков, М.А. Желтов, М.А. Татарко, А.Н. Боковенко Генерирование импульсов электромагнитной эмиссии при кристаллизации дистиллированной воды // Вестник ТГУ. – 1988. – Т. 3, вып. 4. – С. 345–348.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В АРКТИКЕ ПРИ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ

В.П. Мельников¹, Н.С. Молокитина¹, Я.Б. Горелик^{1*}, И.В. Земеров¹, А.Х. Хабитов¹,
М.Н. Железняк², Р.В. Чжан², А.Д. Набережный², П.С. Заболотник², А.А. Чжан²,
А.А. Башкова³, А.Н. Шейн³

1 – ФИЦ ТюмНЦ СО РАН Институт криосферы Земли, г. Тюмень, Россия

2 – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

3 – ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», г. Салехард, Россия

* gorelik@ikz.ru

Аннотация. Рассмотрены ключевые вопросы проблемы надежности инженерных сооружений в Арктике при современном изменении климата и предложен путь ее решения на этапах их проектирования и эксплуатации.

Ключевые слова: мерзлые грунты, основания сооружений, температурный режим, прогноз, мониторинг.

ENSURING A SAFETY OF THE BUILDINGS IN THE ARCTIC IN CONNECTION WITH CLIMATE CHANGE

V.P. Melnikov¹, N.S. Molokitina¹, J.B. Gorelik¹, I.V. Zemerov¹, A.K. Khabitov¹
M.N. Zheleznyak², R.V. Zhang², A.D. Naberezhny², P.S. Zabolotnik², A.A. Zhang²
A.A. Bashkova³, A.N. Shein³

1 – FITS TyumSC SB RAS Earth's Cryosphere Inst., Tyumen, Russia

2 – Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Russia

3 – Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, Russia

* gorelik@ikz.ru

Abstract. The key questions of the reliability problem of the buildings in Arctic for modern climate change are considered and the way of its solution at the steps of projection and exploitation is suggested.

Keywords: frozen ground, building's base, temperature regime, prognosis, monitoring.

Введение. Существующий цикл потепления в настоящее время не имеет видимых тенденций к угасанию. По данным международной группы экспертов, его особенностью является более быстрое изменение среднегодовой температуры планеты по сравнению с аналогичными циклами прошлых эпох. По северным районам РФ современный тренд повышения температуры воздуха составляет примерно 0.06 °C/год, что приводит к возникновению тренда потепления мерзлых грунтов (в интервале до глубины нулевых годовых амплитуд) в пределах 0.02-0.03 °C/год (Мельников и др., 2022). Такой темп может существенно повлиять на изменение механических характеристик высокотемпературных мерзлых грунтов уже спустя 10-летний период с момента его возникновения. Первым пунктом рассматриваемой проблемы является то, что в настоящее время отсутствуют теоретические основы для прогноза длительности циклов климатических изменений. Вторым проблемным пунктом является необходимость количественного прогноза температурного состояния грунтов проектируемого сооружения на весь срок его эксплуатации (порядка 30 лет и более). Однако все нормативные методики такого прогноза основаны на равновесном характере теплообмена грунтов с атмосферой и не имеют возможности учесть климатические изменения.

Суть проблемы прогноза. Главным недостатком существующих прогнозных моделей является отсутствие обоснованного способа определения многофакторных коэффициентов теплообмена мерзлого массива с атмосферой (которые являются функциями тренда потепления

климата). По сути, вся совокупность влияющих на теплообмен факторов (сезонное осадконакопление, видовое развитие растительности, облачность, направление и сила ветра и т.д.) изменяются вслед за климатом. Это влечет изменение коэффициентов, которые за срок эксплуатации сооружений (~30 лет и более) могут поменяться существенно.

Предлагаемый путь решения проблемы прогноза. Предлагаемый путь описан нами ранее и основан на двух базовых посылах: 1) существует способ определения коэффициентов теплообмена по данным инженерно-строительных изысканий (Горелик, Паздерин, 2017); 2) параметры теплообмена грунта с атмосферой, включающие радиационную составляющую, среднелетний и среднезимний коэффициенты теплообмена являются медленно меняющимися величинами и могут быть приняты постоянными при современном тренде потепления в течение не менее 10 лет (Горелик, Земеров, 2022). Отличие прогноза с учетом потепления от иных данных показано кривыми 3 и 4 на рис. 1.

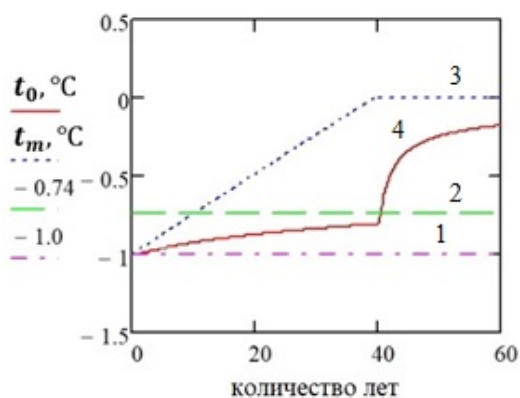


Рис. 1. Изменение температуры на подошве слоя сезонного оттаивания (t_m) и на глубине нулевых амплитуд (t_0): 1 – в отсутствие потепления климата, равновесные условия; 2 – при учете потепления (в 10-летнем цикле) в равновесных условиях теплообмена; 3 – ход температуры t_m при потеплении в неравновесных условиях теплообмена; 4 – ход t_0 при тех же условиях, что в 3.

Предложения по технологии проектирования и эксплуатации сооружений

Прежде всего, необходимо осознание того факта, что в отсутствии методов прогноза длительности и масштабов существующего цикла потепления обычная практика проектирования, рассчитанная на более чем 30-летний срок эксплуатации, может быть использована только с применением значительных запасов в конструктивных элементах сооружений, что приведет к соответствующему росту капитальных затрат. По всей вероятности, реальным выходом из этой ситуации является циклическая технология проектирования и эксплуатации, основанная на 10-летнем прогнозе состояния грунтов и обязательном мониторинге состояния сооружения. По прошествии 10 лет по фактическим данным принимается решение о продолжении эксплуатации, либо выполнении ремонтно-восстановительных работ. Во втором случае выполняется прогноз на последующие 10 лет и создается соответствующий проект (предварительно прогнозная модель корректируется по фактическим данным). Эта процедура повторяется циклически до принятия решения о ликвидации сооружения. Коллектив авторов

настоящего доклада намерен опробовать отдельные элементы такого подхода на ряде сооружений городов Якутска и Салехарда.

Предварительная характеристика объектов наблюдений в г. Якутске

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН проводит наблюдения за формированием температурного режима грунтов основания зданий с проветриваемым подпольем различной высоты. Особое значение в данных исследованиях уделено: плотности застройки, влажностному режиму слоя сезонного оттаивания и аэродинамическим характеристикам воздушной массы в подполье. Полученные данные показывают, что плотность застройки благоприятно сказывается на температурном режиме грунтов. Несмотря на произошедшее изменение климата в сторону повышения температуры воздуха, с момента ввода в эксплуатацию исследуемых объектов наблюдается понижение температуры грунтов основания на глубине 10–12 м (*Чжан и др., 2022*). Однако следует отметить, что такая динамика температурного режима грунтов основания происходит не на всех объектах города и зависит от инженерно-геокриологических, гидрогеологических, техногенных и других условий. Поэтому необходимо организовать полноценный мониторинг города в краткосрочной (10 лет), среднесрочной (30 лет) и долгосрочной (50–100 лет) перспективе. Важным моментом является изучение процессов влагопереноса в слое сезонного оттаивания-промерзания. Особенности формирования и корректировки физических и механических характеристик грунтов этого слоя позволят повысить его общую несущую способность.

Предварительная характеристика объектов наблюдений в г. Салехард

Опытная система геотехнического мониторинга в г. Салехарде (ЯНАО), разрабатываемая Научным центром изучения Арктики, включает температурные скважины, оборудованные в проветриваемых подпольях изучаемых зданий и заглубленные до подошвы фундаментов. Температурные измерения являются в высокой степени автоматизированными: результаты замеров собираются на сервере и дублируются на специально разработанный веб-ресурс для анализа, визуализации и экспорта данных (*Громадский и др., 2019; Камнев, 2021; Filimonov, 2022*). В настоящее время применяемой системой мониторинга оборудовано 10 зданий в г. Салехарде. Суммарно в ней задействовано более 100 термометрических скважин. Некоторые из этих сооружений предполагается включить в рассматриваемый здесь проект.

Литература

Горелик Я. Б., Паздерин Д. С. Корректность постановки и решения задач по прогнозу температуры в основании сооружений на мнг // Криосфера Земли. – 2017. – Т. XXI, № 3. – С. 49–59.

Горелик Я.Б., Земеров И.В. Полуэмпирический метод прогноза термического отклика многолетнемерзлых грунтов на потепление климата // Сб. докладов Шестой конференции геокриологов РФ. – М., МГУ, 2022. – С. 529–537.

Громадский А.Н., Арефьев С.В., Волков Н.Г. и др. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномерзлых грунтов под зданиями г. Салехарда // Науч. вестн. ЯНАО. – 2019. – № 3. –С. 17–21.

Мельников В.П. и др., Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга ТЭК // Криосфера Земли. – 2022. – Т. XXVI, № 4. – С. 3–18.

Чжан А.А. и др., Температурные условия Республиканской больницы №1 – Национального центра медицины в г. Якутске //Сб. докладов Шестой конференции геокриологов РФ. – М., МГУ, 2022. – С. 357–363.

Kamnev Y.K., Filimonov M.Y., Shein A.N., Vaganova N.A. Automated monitoring the temperature under buildings with pile foundations in Salekhard // Geography, Environment, Sustainability, 2021, vol. 14, No. 4, p. 75–82.

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ УСТРОЙСТВА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

В.В. Местников, И.В. Местникова*

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

** ivlmest@gmail.com*

Аннотация. Предметом исследования является разработка рациональных типов фундаментов в многолетнемерзлых грунтах. В данной статье предлагается использование комбинированных свай с термостабилизаторами, обеспечивающих сочетание буроопускного и буронабивного способов устройства свайных фундаментов с сезоннодействующими охлаждающими устройствами. Выполнено математическое моделирование динамики температурного поля грунтового массива на программном комплексе Frost 3D. Произведен численный расчет комбинированной сваи на действие вертикальных, горизонтальных нагрузок и момента в ПК «ANSYS».

Ключевые слова: Свая, термостабилизатор, комбинированный способ, криолитозона.

THE COMBINED METHOD OF ARRANGEMENT OF PILE FOUNDATIONS IN THE PERMAFROST ZONE

V.V. Mestnikov, I.V. Mestnikova*

North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

** ivlmest@gmail.com*

Abstract. The subject of the research is the development of rational types of foundations in permafrost soils. This article proposes the use of combined piles with thermal stabilizers, which provide a combination of drilled and hammered pile foundations with seasonal cooling devices. Mathematical modeling of the dynamics of the temperature field of the soil mass was performed using the Frost 3D software package. A numerical calculation of the combined pile for the action of vertical, horizontal loads and moment was made in the ANSYS software package.

Keywords: pile, heat stabilizer, combined method, cryolithozone.

Здания и сооружения в районах распространения многолетнемерзлых грунтов проектируется в основном по I принципу, т.е. с сохранением мерзлого состояния грунтов в процессе строительства и всего периода эксплуатации (*Гончаров, 2016*). Наиболее распространенными фундаментами для каменных зданий в Республике Саха (Якутия) являются свайные фундаменты, устроенные буроопускным и буронабивным способами. Их основными недостатками являются: высокая стоимость свай, большой объем буровых работ, возможность выпучивания свай в пучинистых грунтах, длительное вмораживание свай и удлинение сроков строительства из-за внесения большого количества тепла при заполнении скважины раствором и др. (*Местников, Местникова, 2019*).

В целях устранения вышеуказанных недостатков разработана комбинированная свая и способ ее устройства (*Местников и др., 2020; Местников и др., 2022*). Свая (рис. 1) состоит из сборной железобетонной части 1 с арматурными выпусками 2, которые необходимы для

надежного закрепления с нижней монолитной частью сваи 3. Встроенная в сборную железобетонную сваю металлическая труба 4 необходима для установки нагревательного элемента для создания нормальных условий твердения бетона в нижней монолитной части сваи 3 и, после схватывания бетона, для закачки хладагента в целях восстановления температурного режима и охлаждения грунтового массива вокруг сваи. Слой щебня или гравия на дне скважины предназначен для предотвращения теплового контакта свежеложенного бетона монолитной части сваи с многолетнемерзлым грунтом под нижним концом сваи. Ствол скважины в деятельном слое заполняют непучинистым грунтом.

(Местников и др., 2020).

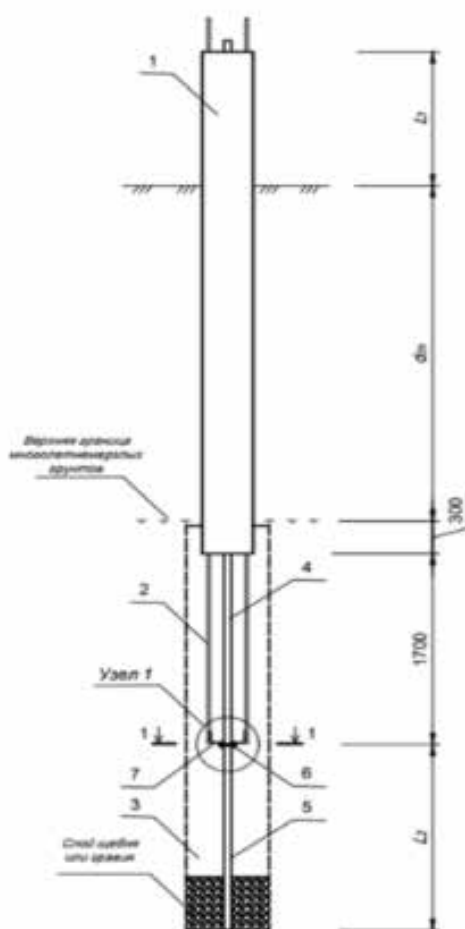


Рисунок 1. Комбинированная свая с термостабилизатором.

Комбинированная свая с термостабилизатором позволит: существенно повысить несущую способность грунтов основания в результате снижения их температуры; сократить сроки строительства за счет уменьшения технологического перерыва на вмерзание свай; увеличить сопротивление свай касательным силам морозного пучения в связи с конструктивными особенностями; снизить стоимость устройства свайных фундаментов, за

счет экономии материалов и уменьшения буровых работ; обеспечить 100 % контроль качества сборной части свай, изготовленной в заводских условиях, которая устанавливается в деятельном слое, где происходят наибольшие разрушения железобетонных конструкций фундаментов.

Моделирование температурного режима примыкающего к сваям грунтового массива выполнен на программном комплексе Frost 3D. Теплофизические характеристики грунтов приняты из инженерно-геологических изысканий участка строительства в с. Хатассы. Начальное распределение температуры грунтового массива принято на момент установки свай, т.е. в июне месяце, при этом температура на глубине нулевых годовых амплитуд составляет $-1,92$ °С. В октябре включается в работу вмонтированный в сваю термостабилизатор (рис. 2). К концу расчетного периода, т.е. через 3 года, температура на глубине 10 метров понизится до $-2,75$ °С, что в конечном итоге значительно повысит несущую способность грунтов основания (рис. 3).

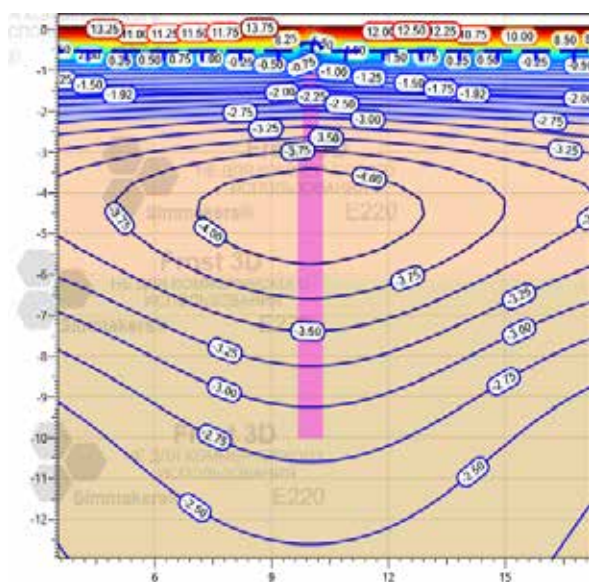


Рисунок 2. Температурное распределение в октябре 2022 г.

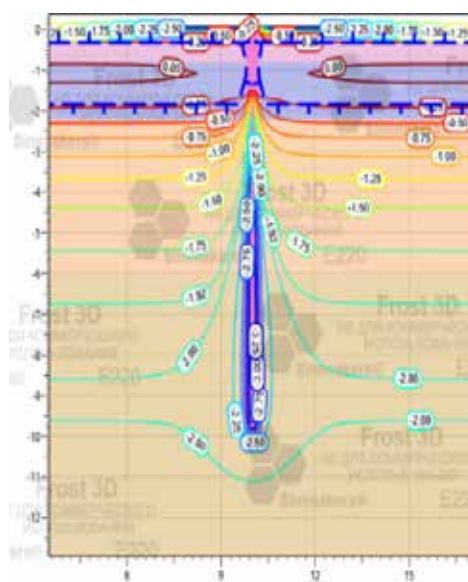


Рисунок 3. Температурное распределение в июне 2025 г.

Расчет прочности комбинированной сваи реализован в ПК Ansys. Армирование сваи принято согласно альбому РМ 2-77 (*Якутгражданпроект, 1977*). Результаты расчётов показали, что наибольшие напряжения и относительные деформации в арматуре и в бетоне возникают в верхней сборной части сваи и ее стыке с нижней монолитной (рис. 4, 5). При этом в нижней монолитной части сваи арматура необходима только для анкеровки сборной части с монолитной, что может привести к значительному снижению металлоемкости.

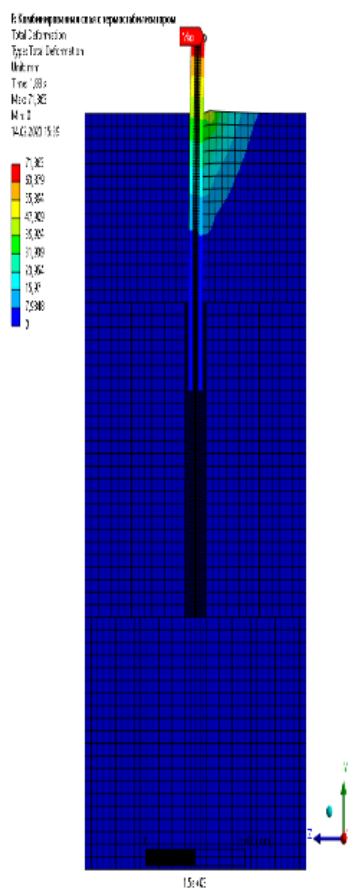


Рисунок 4. Деформации в системе «свая – грунт» в момент разрушения

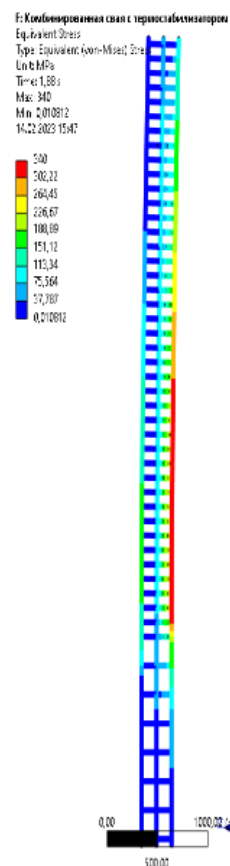


Рисунок 5. Эквивалентные напряжения в арматуре

Таким образом, использование комбинированного способа устройства свайных фундаментов гораздо эффективнее по сравнению с традиционными, так как комбинированные сваи с термостабилизаторами имеют повышенную несущую способность за счет понижения температуры примыкающего к сваям грунтового массива, более устойчивы к воздействию касательных сил морозного пучения, что в конечном итоге может привести к значительной экономии материальных и технических ресурсов.

Литература

Гончаров, Ю. М. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по строительным специальностям / Ю. М. Гончаров. – Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 2016. – 406с.

Местников, В. В., Местникова, И. В. Рациональные типы фундаментов для малоэтажного строительства в криолитозоне // Наука и техника в Якутии.– 2019. – № 2 (37). – С. 8–11.

Пат. 2712976 Российская Федерация, МПК E02D 27/35. Комбинированный способ устройства свайных фундаментов в многолетнемерзлых грунтах / В. В. Местников, И. В. Местникова, В. В. Местников; патентообладатель ООО «Стройоценка»; опубл. 03.02.2020, Бюл. № 4. – 11 с.

Пат. 215428 Российская Федерация, МПК E02D 27/35. Комбинированная свая с термостабилизатором / В. В. Местников, И. В. Местникова, В. В. Местников; опубл. 13.12.2022, Бюл. № 35. – 7 с.

РМ 2-77. Индустриальные строительные изделия для жилищного и гражданского строительства на территории якутской АССР. Сборные железобетонные фундаменты. Альбом № 2. – Якутск : Якутгражданпроект, 1977. – 50 с.

КОНСТРУКЦИИ ЗАЩИТНЫХ ФУТЛЯРОВ ДЛЯ ПОДЗЕМНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

С.Н. Попов^{1*}, Ю.Ю. Федоров¹, О.Н. Буренина¹, П.В. Ксенофонтов²

1 – ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» Сибирского отделения Российской академии наук Институт проблем нефти и газа,
г. Якутск, Россия

2 – ОАО Сахатранснефтегаз, г. Якутск, Россия

* savvapopov49@mail.ru

Аннотация. Практика эксплуатации газопроводов в Якутии показала неоднократные разрушения и деформирование газопроводных труб в защитных футлярах. Причиной явлений была разгерметизация торцовых уплотнений, заполнение полости футляров грунтовыми водами, их замерзание в осенне-зимний период и раздавливание газопроводных труб при образовании льда. Для исключения подобных ситуаций предложено частичное заполнение межтрубного пространства футляра замкнутопористым рулонным пенопластом, в виде покрытия, наклеиваемого на поверхность газопроводной трубы. Наиболее стойкий к многократному замораживанию в воде тип материала определен экспериментально. Предлагаемая конструкция практически полностью исключает возможность возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: газопровод, защитный футляр, макет, грунтовая вода, компенсатор.

DESIGNS OF PROTECTIVE CASES FOR UNDERGROUND GAS PIPELINES

S.N.Popov^{1*}, Yu.Yu.Fedorov¹, O.N. Burenina¹, P.V.Ksenofontov²

1 – Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center "Yakutsk Scientific Center" Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences" Institute of Oil and Gas Problems,
Yakutsk, Russia

2 – OAO Sakhatransneftegaz, Yakutsk, Russia

* savvapopov49@mail.ru

Annotation. The practice of operating gas pipelines in Yakutia has shown repeated destruction and deformation of gas pipelines in protective cases. The cause of the phenomena was the depressurization of the mechanical seals, the filling of the cavity of the cases with groundwater, their freezing in the autumn-winter period, and the crushing of gas pipelines during the formation of ice. To avoid such situations, it is proposed to partially fill the annular space of the case with closed-porous rolled foam plastic, in the form of a coating glued to the surface of the gas pipeline. The type of material most resistant to repeated freezing in water was determined experimentally. The proposed design almost completely eliminates the possibility of emergency situations.

Keywords: gas pipeline, protective case, layout, ground water, compensator.

Как показала практика эксплуатации газопроводов на территории Республики Саха (Якутия), достаточно часто наблюдаются случаи, когда защитные футляры сами становятся источниками аварий в подземных газопроводах, проложенных в слое сезонного промерзания грунта.

При разгерметизации торцовых уплотнений и замерзании воды в футляре, образуется замкнутая полость в межтрубном пространстве и давление, создаваемое при расширении воды (на 9÷10 %), из-за продвижения фронта замерзания воды с торцов, максимально повышается в средней части футляра. Замерзание воды в замкнутой полости приводит к возникновению избыточного давления, превышающего 250 МПа (Васильев, 2002; Киреев, 1978). Давление достигает уровня, который приводит к потере устойчивости стенок газопровода и к ее смятию вплоть до полного смыкания стенок газопровода. Полное смыкание стенок газопровода может произойти за один год (термоцикл), либо в течении нескольких лет.

В научно-технической литературе перечень предложений по повышению надежности и долговечности защитных футляров газопроводов достаточно ограничен (*Горбенко, 2019; Власов, 2011; Раздевилов, 2013; Ralph., 1973*). Для исключения подобных аварий в подземных газопроводах нами предложено следующее: поместить в межтрубное пространство материал, компенсирующий расширение объема воды при замерзании. Для решения данной проблемы были разработаны конструкции защитных футляров (*Васильев, 2018; Попов 2021*).

Компенсирующий материал защитного футляра должен быть морозостойким, деформативным, с низким водопоглощением и сохранять вышеперечисленные свойства в течение срока эксплуатации газопровода (до 50 лет). Для разработанной конструкции были выбраны закрытопористые вспененные полимеры промышленного производства.

Для моделирования срока эксплуатации газопровода проводили 50 циклов замораживания-оттаивания в замкнутых металлических контейнерах (выдержка при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 24 часа, при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 24 часа); после каждого пятого цикла замораживания образцы вынимались и определялись показатели водопоглощения по ГОСТ 15588-86 «Плиты пенополистирольные Технические условия».

Проведенные исследования показали, что пенополиэтилен является наиболее стойким материалом; водопоглощение после 50 термоциклов увеличивается только на 9 %. С учетом выявленной ситуации следует вывод о том, что для компенсации 9÷10 % расширения воды при замерзании, с учетом разрушения замкнутости пор при многократном промораживании и двухкратным запасом непредвиденных случайных разрушений пор для обеспечения, к примеру, пятидесятилетнего срока службы газопроводов, будет вполне достаточно заполнять межтрубное пространство пенополиэтиленом на 35–40 % его объема.

Для проведения испытаний разработан и изготовлен макет защитного футляра, который состоит из стальной оболочки, внутри размещается модель газопроводной трубы. На газопроводную трубу намотано покрытие из пенополиэтилена толщиной 5 мм, что составляет 30 % объема межтрубного пространства. Торцы футляра герметизируются крышками с резиновыми прокладками и стягиваются между собой.

Межтрубное пространство в макете футляра заполняли водой и проводили термоциклирование в режиме двух суток при температуре $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ и одних суток при комнатной температуре до полного таяния льда в футляре. После выемки футляра осуществлялся визуальный контроль состояния газопроводной трубы и при появлении деформаций производились измерения их величин. После контрольных наблюдений цикл промораживания повторялся. В ходе таких экспериментов термоциклирование

производилось пятидесятикратно, что моделировало работу защитного футляра в течение пятидесяти лет (нормативный срок эксплуатации полиэтиленового газопровода).

В процессе экспериментов деформирование модели газопроводной трубы наблюдалось только при отсутствии компенсатора рис. 1, а. В экспериментах с использованием компенсирующего пенополиэтиленового слоя никаких деформаций не выявлено. Эксперименты проводились при концентричном и эксцентричном размещении газопроводной трубы в футляре (рис. 1, б; 1, в).

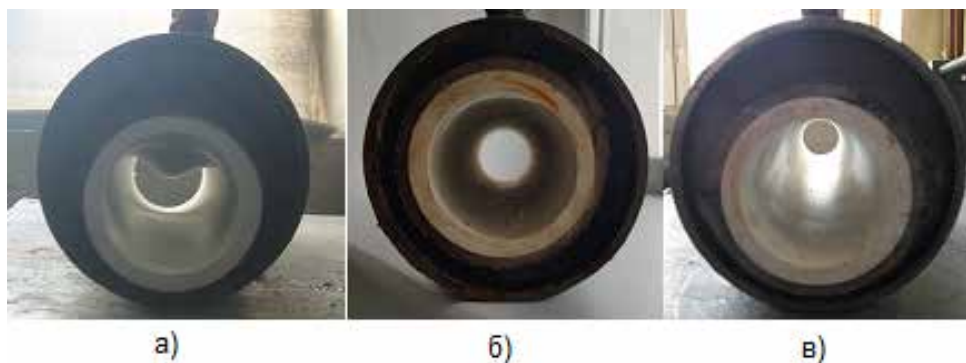


Рисунок 1. Фото макета защитного футляра с компенсатором при различных расположениях газопровода внутри защитного футляра: а – без компенсатора; б – концентричном; в – эксцентричном.

Таким образом, разработан и апробирован макет защитного футляра для газопроводов, проложенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Испытания макета показали его работоспособность, ожидаемая долговечность не ниже нормативного срока эксплуатации стальных газопроводов. Возникновение аварийных ситуаций при разгерметизации торцовых уплотнений практически исключаются.

Литература

- Васильев В.И., Михайлов В.А., Попов В.В. Замерзание воды в замкнутом объеме // Труды I Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. – Якутск, 2002. – Часть IV. – С. 41–48.
- Киреев В.А. Краткий курс физической химии. – М.: «Химия», 1978. – 622 с.
- Патент РФ 183262 U 1. Защитный футляр / Васильев С.В., Ксенофонтов П.В., Попов С.Н. и др. // Бюл. № 26. – 2018.
- Патент РФ 2426930U 1. Система перехода магистрального трубопровода через дорогу и способ ее приготовления / Власов С.В., Бурцев С.А., Алявдин Г.И. // Бюл. № 23. – 2011.
- Патент РФ 186886 U 1. Защитный кожух для трубопроводов / Горбенко К.П., Силаков А.Т. // Бюл. № 19. – 2019.
- Патент РФ 202636 U 1. Устройство для защиты газопроводов от механических повреждений / Попов С.Н., Федоров Ю.Ю., Ксенофонтов П.В. и др. // Бюл. № 7. – 2021.
- Патент РФ 133248U1. Защитный футляр / Раздевилов К.Н., Царьков В.Н., Ревенко Ю.Д. и др. // Бюл. № 29. – 2013.
- Patent US 3,774,403. SYSTEM FOR ROADBED TRAVERSING BY PIPELINE Ralph H. Cushing // № 45. – 1973.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КАСАТЕЛЬНЫХ СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

С.Н. Попов*, О.Н. Буренина, А.В. Андреева, М.Е. Саввинова, Т.М. Соловьев

*ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского
отделения Российской академии наук» Институт проблем нефти и газа, г. Якутск, Россия*

* savvapopov49@mail.ru

Аннотация. Разработано оригинальное устройство для измерения касательных сил морозного пучения цилиндрических образцов (макетов свай и опор ЛЭП) с различными типами покрытий из грунта при его замерзании. В конструкции устройства возможно моделирование процессов пучения грунта различного состава, влажности и плотности. Кроме измерения касательных сил морозного пучения, на устройстве можно измерить величины выпучивания из грунта образцов в процессе их многократного замораживания. Результаты экспериментов позволяют определить наиболее эффективные типы покрытий, снижающих выпучиваемость фундаментных свай и опор ЛЭП из замерзающего грунта.

Ключевые слова: пучение, грунт, макет свай, металл, древесина, покрытие.

DEVICE FOR MEASURING TANGENT FORCES OF FROSTY HEAVING UNDER LABORATORY CONDITIONS

S.N. Popov*, O.N. Burenina, A.V. Andreeva, M.E. Savvinova, T.M. Solovev

*Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS - Division of Federal Research
Centre «The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»,*

Yakutsk, Russia

* savvapopov49@mail.ru

Abstract. An original device has been developed and patented for measuring the shear forces of frost heaving of cylindrical samples (pile prototype) with various soil coatings types during its freezing. The device design simulates the processes of heaving soil of different compositions, humidity, and density. The report provides detailed descriptions of the device design and the methodology for conducting experiments, along with the results of measuring the values of tangential forces during buckling from the ground of mock-up piles made of steel and wood with various polymer coatings. In addition to measuring the shear forces of frost heaving on the device, it is possible to measure the buckling values of samples made of various materials, including during repeated freezing.

Keywords: heaving, soil, pile prototype, metal, wood, coating.

В последние годы в Якутии в связи с увеличением глубины сезонного протаивания грунта, обусленного потеплением климата, заметно интенсифицировались процессы выпучивания из грунта фундаментных свай и опор ЛЭП. Основным методом замедления этих процессов является снижение адгезионного взаимодействия между поверхностью опор и грунтом. С этой целью на поверхность опор, располагающихся в зоне сезонного протаивания грунта, наносят специальные покрытия, характеризующиеся высокими криофобными и антифрикционными свойствами, а также износостойкостью. К ним относятся различные термоусаживающиеся оболочки из термопластичных полимеров, покрытия на основе эпоксидных и кремнеорганических смол и других материалов.

Следует отметить, что определение наиболее эффективных типов покрытий является достаточно сложным и трудоемким. В действующем стандартизованном методе измерения касательных сил морозного пучения ГОСТ 27217-2012, являющегося, на наш взгляд, наиболее достоверным, недостатком является большая продолжительность эксперимента. Эксперименты по ГОСТ Р 56726-2015, несмотря на возможность значительного ускорения,

по сути, позволяют измерять величину касательных сил косвенно, поскольку направлены на определение сил трения материалов по мерзлому грунту. Известный прибор для определения сил морозного пучения грунта (патент РФ № 746033) также характеризуется аналогичным недостатком.

Конструкция предлагаемого устройства для измерения касательных сил морозного пучения модельных образцов, выполненных с различными покрытиями из замерзающего грунта, представлена на рисунке 1.

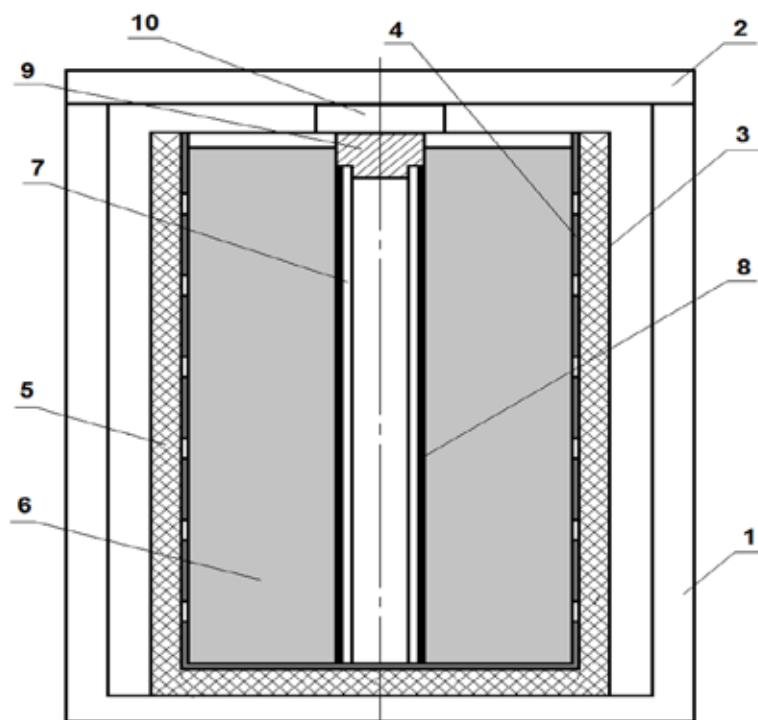


Рисунок 1. Схема устройства для измерения касательных сил морозного выпучивания моделей свай и опор ЛЭП из грунта.

Устройство содержит раму 1 со съемной верхней частью 2, контейнер с двойными стенками 3 и 4, пространство между которыми заполнено теплоизолятором 5. Внутренняя полость контейнера заполняется грунтом 6, в ее центре размещается опытный образец 7. На ее поверхность может быть нанесено криофобное покрытие 8. В верхней части модели сваи устанавливается теплоизолирующая прокладка 9, между которой и верхней частью рамы размещается динамометр сжатия 10. Внутренняя стенка 4 выполнена из полимерного материала с пониженной теплопроводностью. Съемная верхняя часть обеспечивает удобство монтажа установки.

Смонтированное устройство в раме размещается в морозильной камере, после включения которой начинается процесс замораживания и вспучивания грунта с его верхней части, контактирующей с охлаждающим воздухом. Выпучивающийся грунт, одновременно

примерзающий к модели сваи, воздействует через нее и проставку на динамометр сжатия, по показаниям которого производится измерение касательных сил морозного пучения. Расположение модели по центру контейнера обеспечивает его равномерное обжатие по периметру замерзающим и расширяющимся грунтом. Использование предлагаемого технического решения будет способствовать более корректному воспроизведению процессов промораживания грунта в лабораторных условиях и ускорению экспериментов.

Необходимо отметить, что кроме измерения касательных сил морозного пучения, предлагаемое устройство можно использовать для измерения величин морозного выпучивания модельных образцов из замерзающих грунтов различного состава и влажности. В этом случае эксперименты проводятся без установки динамометрического датчика. В процессе замерзания грунта лазерным дальномером осуществляется измерение величин вертикального перемещения верхней части образца. По результатам измерений через определенные промежутки времени может быть получена информация о динамике процесса выпучивания. Замораживание грунта при этом может осуществляться многократно, моделируя многолетний процесс.

Результаты исследований образцов с различными типами покрытий позволят определить наиболее эффективные для снижения выпучиваемости фундаментных свай и опор линий электропередач. Оригинальность разработанной конструкции подтверждена патентом (*Патент...*, 2022).

Литература

Патент РФ « 213144 U1, E02D 1/02 «Устройство для моделирования и измерения касательных сил морозного пучения», опубл.25.08.2022, бюл. № 14.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРОИЗВОДСТВА АО «НПП "ЭТАЛОН"»

В.Н. Пугач*

АО «Научно-производственное предприятие "Эталон"», г. Омск, Россия

** fgup@omsketalon.ru*

Аннотация. 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.

Ключевые слова: криолитозона, многолетние изменения, мониторинг, температура грунтов, термокоса.

AUTOMATED SYSTEMS FOR MONITORING THE TEMPERATURE OF PERMAFROST SOILS PRODUCED BY "JSC RESEARCH-AND-INDUSTRIAL ENTERPRISE "ETALON"

V.N. Pugach*

Joint Stock Company research-and-industrial enterprise Etalon," Omsk, Russia

** fgup@omsketalon.ru*

Annotation. For the safety of the functioning of transport infrastructure facilities and the oil and gas complex in the northern regions of Russia, it is proposed to carry out temperature monitoring of facilities in order to identify and eliminate emergency situations in areas of permafrost using various temperature monitoring systems.

The developed monitoring systems are designed for field determination of soil temperature according to ГОСТ 25358-2012, where it is required to obtain data on the temperature state of soils.

Keywords: cryolithozone, long-term changes, monitoring, soil temperature, thermal mowing (multi-zone digital temperature sensor).

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.

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).

В зависимости от варианта исполнения, передача данных потребителю может быть осуществлена: 1) по витой паре или оптоволокну на внешний сервер; 2) по витой паре или оптоволокну на ПК со встроенного в ШСПД сервера; 3) по GSM-связи на внешний сервер. ШСПД имеет степень защиты от пыли и воды IP65 и оснащен термостатом для подогрева электроники для работы при отрицательных температурах окружающего воздуха до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 1. Шкаф сбора и передачи данных ШСПД.

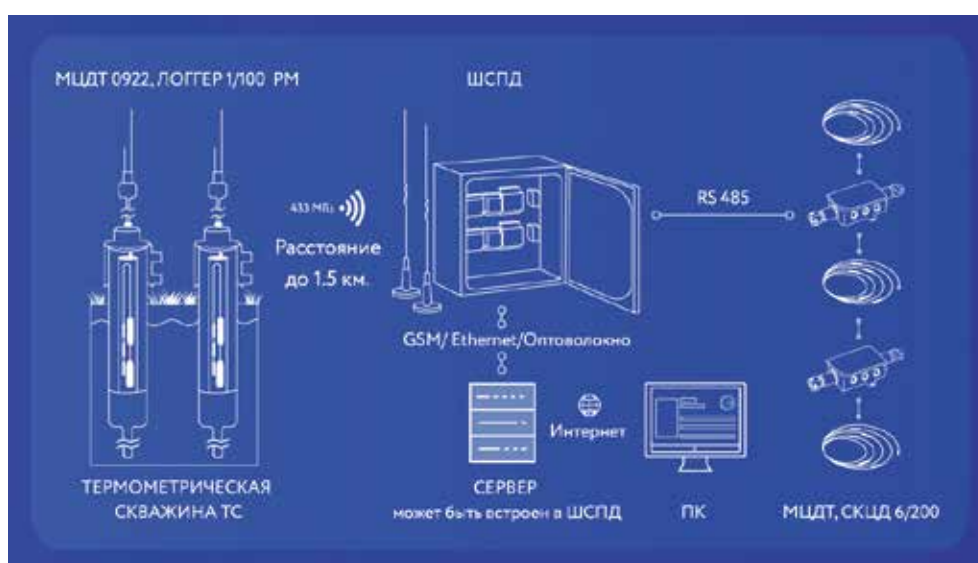


Рисунок 2. Конфигурация сети геотехнического мониторинга.

Для проведения оперативных замеров используется комплект оборудования, состоящий из контроллера ПКЦД-1/100 и термокосы МЦДТ 0922. ПКЦД-1/100 позволяет устойчиво считывать показания с термокос с интервалом опроса от 10 секунд до 1 часа, а также сохранять информацию об измеренной температуре каждого датчика в термокосу в энергонезависимой памяти прибора. Термокосы МЦДТ 0922 имеют следующие достоинства: интервал между поверками – 5 лет; кабель с усиленной стальной жилой; кабель остается гибким при отрицательных температурах; степень защиты от пыли и воды IP68.

Для проведения автономных замеров температурных полей удаленных и труднодоступных объектов (термометрических скважин) используется комплект оборудования, состоящий из логгеров ЛЦД-1/100-SD или ЛЦД-2-USB и термокос МЦДТ 0922 или МЦДТ 1201. Логгер совместно с термокосой размещаются в термометрической скважине ниже уровня земли и работают автономно в течение нескольких лет.

Для решения задач по автономному мониторингу и передаче данных по беспроводной линии связи используется вариант на базе логгеров ЛЦД-1/100-PM, ЛЦД-2-RM. В линейке ЛЦД-2 имеется исполнение GSM. Данный логгер передает данные по сети сотового оператора на удаленный сервер, таким образом данный вариант не требует дополнительного оборудования для передачи данных и выездов к месту установки логгеров. Отличительными особенностями ЛЦД-2 по сравнению с ЛЦД-1/100 являются: увеличенная емкость элементов питания и, соответственно, увеличенный срок автономной работы, так же увеличен объем встроенной памяти для хранения измерений с МЦДТ, кроме этого ЛЦД-2 получил степень защиты от пыли и воды IP68. Анализ работы системы показал высокую точность и надежность приборов, получена качественно новая информация о температурном режиме объекта земляного полотна.

Разработанная автоматизированная система позволяет удаленно производить сбор данных с систем температурного мониторинга грунтов, без необходимости выезжать на объект, что значительно повышает эффективность работы с системами температурного мониторинга грунтов.

Многие годы оборудование в различных его конфигурациях успешно эксплуатируется в таких компаниях, как ПАО «Газпром», ПАО НК «Роснефть» и других, осуществляющих свою деятельность в районах вечной мерзлоты, где требуется контролировать температурные режимы грунта.

Литература

Корниенко С.Г. Изучение и мониторинг мерзлых грунтов с использованием данных космической съемки // Материалы 11-й Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформатика в нефтегазовой отрасли».

Минкин Марк Строительство нефтегазовых объектов на Севере // Материалы семинара «Вопросы проектирования фундаментов на особых грунтах. Новые геотехнические конструкции и методы их расчетов». – 2010.

Никоненко В.А., Кропачев Д.Ю., Сиротюк В.В., Иванов Е.В. Мониторинг температуры на транспортных объектах в регионах с сезонно промерзающими и многолетнемерзлыми грунтами / Приборы. – Москва: Союз общественных объединений «Международное научно-техническое общество приборостроителей и метрологов», 2015. – Вып. 9 (183). – С. 7–13.

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА УПРАВЛЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТЬЮ ТРУБОПРОВОДОВ

И. В. Ряховских^{*}, О. В. Трифонов

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская обл., Россия

*[*I_Ryakhovskikh@vniigaz.gazprom.ru](mailto:I_Ryakhovskikh@vniigaz.gazprom.ru)*

Аннотация. Представлен прототип цифровой платформы управления целостностью трубопроводов, разработанный на базе программного обеспечения с открытым кодом с использованием технологий больших данных и машинного обучения (ЦП). ЦП представляет собой универсальный программный комплекс, обеспечивающий визуализацию 3D-структуры трубопроводов, данных технического диагностирования и результатов их анализа. ИС впервые реализует процессы машинного распознавания элементов трубопроводов и образов дефектов на основании данных дефектометрии и систем мониторинга, а также предиктивного моделирования поврежденности трубопроводов дефектами. В основе ИС положена модель многофакторного

целевого планирования мероприятий системы управления целостностью трубопроводов, представленная на примере технологических трубопроводов компрессорных станций. Модель обеспечивает методическое единство при оценке работоспособности, прогнозировании ресурса, мониторинге состояния и управлении целевыми показателями целостности трубопровода. Нормативная база ЦП основана на рискориентированных подходах к планированию производственных программ, учитывающих экспериментальные данные о степени опасности и скоростях развития эксплуатационных дефектов трубопроводов, характеристиках средств технического диагностирования и результатах верификации диагностических данных, режимах и условиях эксплуатации трубопроводов. Экономический эффект от применения прототипа цифровой платформы в 2021–2022 гг. оценивается более 200 млн руб., что обусловлено снижением рисков наступления негативных событий за счет выявления 1331 аварийных и предельных дефектов в результате адресного планирования объектов технического диагностирования.

Ключевые слова: цифровая платформа, трубопровод, дефектометрия, система мониторинга.

DIGITAL PIPELINE INTEGRITY MANAGEMENT PLATFORM

I. V. Ryakhovskikh^{*}, O. V. Trifonov

^{} LLC «GAZPROM VNIIGAZ», Moscow region, Russian Federation*

^{}I. Ryakhovskikh@vniigaz.gazprom.ru*

Annotation. Paper represents a knowledge concerning to digital pipeline integrity management platform, which was developed on open source software using a Big data and Machine learning technologies (DP). The DP is a universal software suite that provides 3D pipeline visualization with non-destructive testing data and analysis layers. First in history the DP implements computer vision technology for pipeline constructions and flaw images recognition using flaw sizing and surveillance data, as well as pipeline failure predictive modeling data. Pipeline integrity management system procedures in DP are based on multifactor target planning model, described on flowing plant process pipelines example. The model provides methodological unity in health assessment, lifetime forecasting, health surveillance and pipeline integrity target factors management. Risk-oriented approaches for operational programs planning stages are implemented in DP regulatory base, which consider risk level experimental data and pipeline flaw growth rate, the characteristics of diagnostic equipments and the results of diagnostic data verification, type of duty and field conditions. More than 200 million rubles cost impact is estimated due to DP pilot version running within 2021–2022 time gap. The reason is that emergency risks were cutted down due to precise objective diagnostics planning that revealed 1331 high-level risk flaws.

Keywords: digital platform, pipeline, flaw detection, monitoring system.

Современным вызовом для компаний, эксплуатирующих сети подземных трубопроводов, являются процессы замедленного разрушения стальных элементов под действием коррозионной среды и механических нагрузок. Это объясняет значимость решения задачи своевременного обнаружения аномалий, оценки ресурса поврежденных элементов и последующего мониторинга трубопроводов, а также адресного планирования мероприятий по их санации с применением ресурсосберегающих технологий и современных материалов (Ряховских, и др., 2020).

Представлен прототип цифровой платформы управления целостностью трубопроводов (ЦП) – новейшего инструмента для сбора, хранения, агрегации, аналитики диагностической информации и поддержки принятия управленческих решений. ЦП является универсальным программным комплексом технологий в области нейросетевых технологий и искусственного интеллекта, программной инженерии, предиктивной аналитики. ЦП обеспечивает 3D-визуализацию сложных по конфигурации трубопроводов с послойной привязкой данных технического диагностирования и результатов их анализа. Реализованы процессы машинного распознавания элементов трубопроводов и образов дефектов на

основании дефектограмм, переданных внутритрубных инспекционных приборов (ВИП) и внутритрубных автоматизированных диагностических комплексов (ВАДК), что обеспечивает 100-кратное сокращение времени распознавания «сырых» диагностических данных (Ряховских и др., 2020).

В основе логики работы цифровой платформы положена модель многофакторного целевого планирования мероприятий Системы управления целостностью (СУЦ) ПАО «Газпром», учитывающая полноту данных технического диагностирования, поврежденность труб различными группами дефектов, финансовые и технические ограничения. Модель СУЦ стандартизирована в нормативных документах ПАО «Газпром», что обеспечивает методическое единство при оценке, прогнозировании, мониторинге, управлении целевыми показателями технического состояния и надежности трубопровода.

В качестве основы целевого планирования мероприятий СУЦ использованы расчетно-экспериментальные модели оценки прочности и ресурса трубопроводов, на основе которых осуществляется оценка ресурса МТ с дефектами (Ryakhovskikh, Bogdanov, 2021), а также формируются требования к выявлению повреждений с применением ВИП и ВАДК и ремонту дефектов (Ryakhovskikh et al., 2022). Одним из важнейших достижений реализуемого методического подхода стало внедрение рискориентированного контроля при эксплуатации трубопроводов (Ряховских, 2022), согласно которому установлено 4 класса надежности, каждому из которых соответствует диапазон значений расчетной вероятности отказа дефектного элемента Q . На рис. 1 приведена графическая интерпретация зависимостей размеров дефектов (ϵ – относительная глубина, ед.; L – длина, мм), соответствующих различным классам надежности эксплуатируемого элемента с повреждением.

Кросс-графики, представленные на рис. 1, наглядно демонстрируют корреляцию расчетной оценки степени опасности (Трифонов и др., 2021) и работоспособности дефектных элементов трубопровода, класса надежности эксплуатируемого элемента, вероятности обнаружения и идентификации эксплуатационных дефектов МТ и кинетики их развития во времени (Ряховских, 2022).

Представлены результаты применения прототипа цифровой платформы в 2020–2022 гг. при расчете целевых показателей более чем 2000 км технологических трубопроводов компрессорных станций при формировании производственных программ, их ремонта и технического диагностирования. Проанализировано порядка 120 000 дефектов по данным внутритрубных инспекций линейной части магистральных трубопроводов. Прототип цифровой платформы может быть применен для анализа и прогноза технического состояния трубопроводных систем в сложных природно-климатических условиях в рамках интеграции

данных систем мониторинга технического состояния и геотехнического мониторинга грунтовой среды.

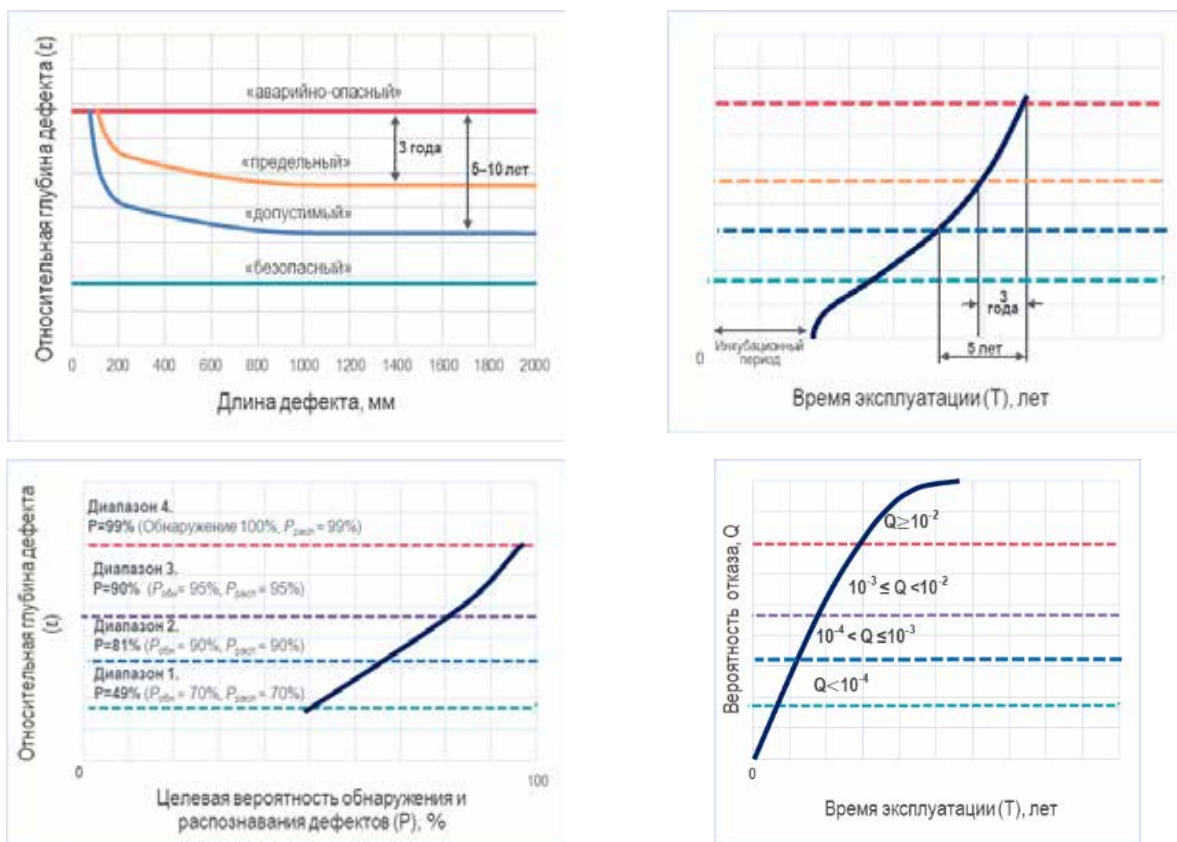


Рисунок 1. Графическая взаимосвязь между размерами эксплуатационного повреждения (а), скоростью его развития и межинспекционным интервалом (б), классом надежности эксплуатируемого элемента с повреждением (в) и требованиям к вероятности обнаружения и распознавания типа повреждения по данным ВИП и ВАДК (г).

Экономический эффект от применения прототипа цифровой платформы в 2021-2022 гг. оценивается более чем в 200 млн руб., что обусловлено снижением рисков наступления негативных событий за счет выявления 1331 аварийных и предельных дефектов в результате адресного планирования объектов технического диагностирования.

Литература

- Ряховских, И. В. Безопасная эксплуатация газопроводов на базе модели управления коррозионным растрескиванием под напряжением / И. В. Ряховских // Вести газовой науки. – 2022. – № 1 (50). – С. 17–30.
- Ряховских, И. В., Подольская, В. В. и др. Модель системы управления целостностью технологических трубопроводов компрессорных станций в условиях неполноты данных об их техническом состоянии / И. В. Ряховских [и др.] // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2020. – № 4 (118). – С. 67–78.
- Ряховских, И. В., Каверин, А. А. и др. Оценка размеров стресс-коррозионных дефектов при техническом диагностировании газопроводов / И. В. Ряховских [и др.] // Вести газовой науки. – 2020. – № 2 (44). – С. 1–14.
- Трифонов, О. В., Морин, И. Ю. и др. Принципы классификации участков по прогнозируемой опасности для магистральных газопроводов, расположенных в зонах развития опасных инженерно-геокриологических процессов / О. В. Трифонов [и др.] // Наука и техника в газовой промышленности. – 2021. – № 2. – С. 82–98.

Ryakhovskikh, I. V., Kashkovskiy et al. Safe operation of gas pipelines based on the control of stress corrosion cracking // International Journal of Structural Integrity, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print (2021). <https://doi.org/10.1108/IJSI-05-2021-0052>

Ryakhovskikh, I. V., Bogdanov R. I. Model of stress corrosion cracking and practical guidelines for pipelines operation // Eng. Fail. Anal. 121 (2021). 105134.

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

П.М. Сазонов^{*}, А. Г. Алексеев

АО «НИЦ «Строительство» НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, г. Москва, Россия

** sazonov-pm@yandex.ru*

Аннотация. Проектирование фундаментов на многолетнемерзлых грунтах в различных регионах страны имеет свои особенности в связи с отличающимися инженерно-геокриологическими условиями. Кроме того, выбор проектного решения по фундаментам должен учитывать конструктивные особенности здания, его тепловые характеристики, размеры, технологические процессы. В статье представлен опыт авторов, полученный при проектировании и научно-техническом сопровождении проектирования и строительства оснований и фундаментов нескольких зданий в различных инженерно-геологических условиях Салехарда, Норильска, Якутска, поселка Сабетта.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, проектирование, основания, фундаменты.

ACTUAL QUESTIONS OF FOUNDATIONS DESIGN ON PERMAFROST SOILS

P. M. Sazonov^{*}, A. G. Alekseev

JSC «SIC «Construction» NIIOSP named after N. M. Gersevanov, Moscow, Russia

** sazonov-pm@yandex.ru*

Abstract. The design of foundations on permafrost soils in various regions of the country has its own peculiarities due to different engineering and geocryological conditions. In addition, the choice of a design solution for foundations should take into account the structural features of the building, its thermal characteristics, dimensions, technological processes. The article presents the authors' experience gained in the design and scientific and technical support of the design and construction of bases and foundations of several buildings in various engineering and geological conditions of Salekhard, Norilsk, Yakutsk, Sabetta.

Keywords: permafrost, design, bases, foundations.

Особое внимание при разработке проектов зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) уделяется проектированию фундаментов: моделированию их теплового взаимодействия с мерзлыми грунтами, прогнозированию изменения прочностных и деформационных свойств грунтов во времени при изменяющемся температурном режиме, выбору наиболее оптимальной конструкции фундамента, сохраняющей устойчивость при промораживании или оттаивании грунтов в период строительства и эксплуатации сооружения.

Геокриологические условия в различных районах криолитозоны России имеют существенные различия и требуют разных подходов к проектированию оснований и фундаментов сооружений. Наиболее значительными факторами, влияющими на выбор проектного решения по фундаментам, являются характер распространения и температура ММГ, размеры сооружений в плане, архитектурные и конструктивно-технологические особенности сооружений (рис. 1).

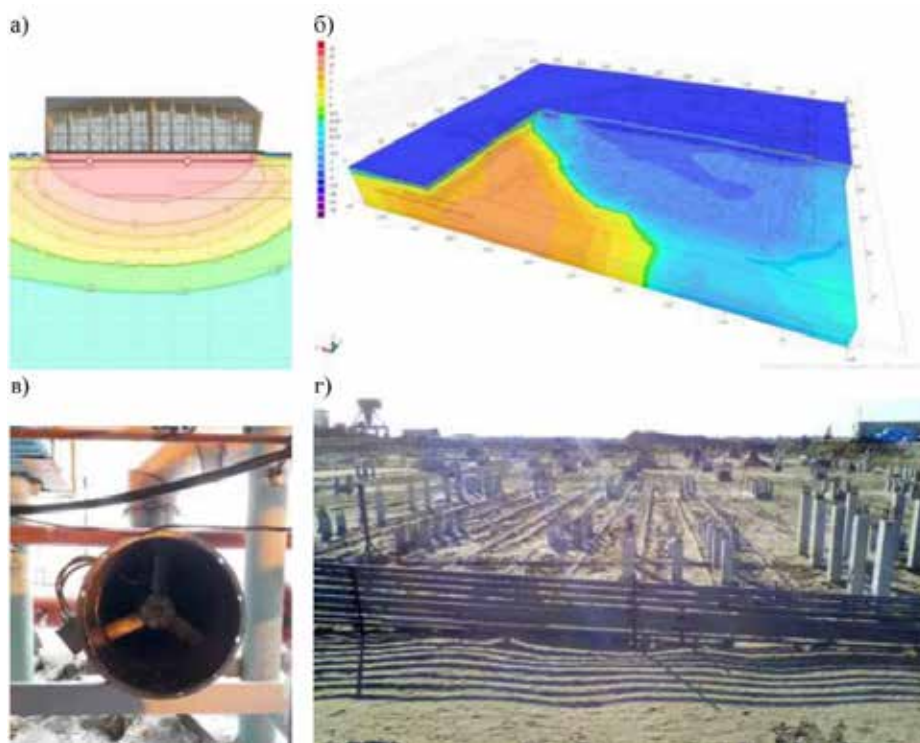


Рисунок 1. Особенности проектных решений на примере различных объектов: а – универсальный спортивный тренировочный манеж с беговой дорожкой и крытой площадкой для воркаута по пр. Молодежи в г. Салехарде; б – реконструкция Кайерканской, Норильской и Дудинской нефтебаз в Норильском промышленном регионе; в – электростанция Ямал СПГ в п. Сабетта на п-ове Ямал ЯНАО; г – строительство высокотехнологичной Жатайской судостроительной верфи на базе модернизации и реконструкции Жатайского судостроительно-судоремонтного завода», Республика Саха (Якутия), городской округ «Жатай».

Спецификой геокриологических условий таких городов, как Салехард, Лабытнанги, Новый Уренгой является наличие ММГ на глубине 15–20 м. При проектировании фундаментов делается выбор: либо использовать термостабизацию для замораживания грунтов от поверхности до кровли мерзлых грунтов, либо выполнять предпостроечное оттаивание мерзлых грунтов до глубины 25–30 м, соответствующей глубине чаши оттаивания, образующейся в процессе эксплуатации сооружения. В противном случае при оттаивании грунтов в процессе эксплуатации будет происходить их осадка и, как следствие, деформация сооружения.

Особенного подхода к проектированию фундаментов требуют объекты реконструкции, а именно объекты, на которых уже длительное время имеются здания и сооружения, в основании которых по разным причинам образовались чаши оттаивания. В таких случаях уже на стадии инженерно-геологических изысканий необходимо определять свойства грунтов в зонах мерзлых грунтов и в зонах техногенно растепленных грунтов. При этом растепленные грунты, отобранные в талом состоянии, перед лабораторными испытаниями следует замораживать при проектных температурах, чтобы исследовать их свойства в мерзлом состоянии при выборе принципа I строительства.

В современное время в районах распространения ММГ строятся здания и сооружения значительных размеров в плане, шириной до 100 м. При такой ширине имеется риск образования застойных зон теплового воздуха под центром сооружения с дальнейшим оттаиванием мерзлых грунтов под сооружением. При значительных размерах сооружений следует рассчитывать температуру и скорость воздуха в подполье, в необходимых случаях проектировать систему искусственного вентилирования с помощью воздуховодов и вентиляторов.

Существуют случаи, когда по технологическим причинам отсутствует возможность устройства сооружения с вентилируемым подпольем. В таких случаях сооружение строится с полами по грунту, и тепловыделение от него передается напрямую в грунт. Для сохранения грунтов в мерзлом состоянии устраивается система горизонтальных термостабилизаторов, работа которых заключается в промораживании за зимний период грунтов, оттаявших за летний период. При необходимости термостабилизаторы проектируют с возможностью подключения к холодильным машинам для круглогодичного действия.

Актуальным вопросом сегодня является устройство автоматизированной системы геотехнического мониторинга, позволяющей не только собирать информацию по показаниям различных элементов мониторинга (температура грунтов, деформация грунтов и фундамента, уровень подземных вод и др.), но и анализировать полученные данные на предмет соответствия проектным решениям. В перспективе данная система должна иметь возможность управления термостабилизирующими мероприятиями, заложенными в проекте, т.е. при необходимости включать/выключать термостабилизаторы и вентиляторы, открывать и закрывать, менять угол наклона жалюзийных решеток ограждения вентилируемых подполий и т.д.

В современное время процесс проектирования оснований и фундаментов на ММГ включает в себя решение непростых задач, связанных с учетом глубоко расположенных от поверхности мерзлых грунтов, зон техногенно растепленных грунтов, чередования мерзлых и талых грунтов, значительных размеров зданий и сооружений, их особенностей технологического назначения, необходимостью усиления грунтов и др. Некоторые вопросы удается решить в рамках стандартного проектирования, другие требуют привлечения научно-технического сопровождения проектирования. В рамках научно-технического сопровождения проводятся исследования дополнительных свойств грунтов в мерзлом, талом, оттаивающем и промерзающем состояниях, разрабатываются новые типы фундаментов и методики их расчета, проводятся лабораторные и полевые эксперименты взаимодействия фундаментов с грунтами.

ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГОВЫХ ПЛОЩАДОК НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ В КРИОЛИТОЗОНЕ

И.И. Сыромятников*, А.Р. Кириллин, А.В. Литовко, А.Ф. Жирков, М.Н. Железняк

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

* igor@mpi.ysn.ru

Аннотация. В работе рассмотрены проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог в зоне развития многолетнемерзлых грунтов. Обоснована необходимость обустройства специальных постов геотехнического мониторинга на участках автодорог с различными инженерно-геокриологическими условиями для оценки и прогноза устойчивости элементов дорожной конструкции и грунтов основания в условиях меняющегося климата. Приведены методические рекомендации по организации и проведению комплексного геотехнического мониторинга за состоянием автомобильной дороги и развитием опасных криогенных процессов.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг, автомобильная дорога, криолитозона, температура грунтов, криогенные процессы.

DEVELOPMENT OF ROADWAY MONITORING SITES IN PERMAFROST REGIONS

I.I. Syromyatnikov*, A.R. Kirillin, A.V. Litovko, A.F. Zhirkov, M.N. Zheleznyak

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

* igor@mpi.ysn.ru

Abstract. This paper addresses the issues of roadway construction and operation in permafrost regions. The need to develop a system of geotechnical monitoring sites covering different permafrost conditions in order to assess and predict the pavement and subgrade behavior in a changing climate is discussed. Recommendations for the design and implementation of a comprehensive program to monitor roadway performance and permafrost-related problems are presented.

Keywords: geotechnical monitoring, roadway, permafrost, ground temperature, geocryological processes.

В последнее десятилетие отмечается ускорение процессов деформации автомобильных дорог в зоне вечной мерзлоты, в том числе дорог, построенных несколько десятилетий назад. Это свидетельствует об изменении состояния многолетнемерзлых и сезонномерзлых грунтов в основании автомобильных дорог, что требует анализа протекающих процессов на базе мониторинга их состояния в сочетании с расчетными методами.

Опыт строительства и эксплуатации автомобильных дорог и искусственных сооружений на них в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов показывает, что развитие криогенных процессов в полосе отвода автодороги, а также в непосредственной близости от неё, может явиться причиной деформаций земляного полотна и недопустимого транспортно-эксплуатационного состояния автодороги. Основными деформациями земляного полотна являются: неконтролируемые просадки и неравномерные осадки оттаивания, расползание насыпи земляного полотна, оползание обочин и откосов, разрушение откосов под влиянием термоэрозии, морозное пучение и процесс наледообразования, солифлюкция на пологих склонах вдоль дороги.

Поэтому для недопущения этих явлений или минимизации их влияния, должны выполняться на основе специальных исследований соответствующие обоснованные мероприятия. Для обоснования мероприятий необходима научная оценка состояния

автомобильной дороги и дорожных сооружений, включая специальные мониторинговые стационарные посты и специальные устройства на ключевых участках.

Для контроля состояния и эффективной дальнейшей эксплуатации автомобильной дороги необходимо создание системы контроля (мониторинга) инженерно-геокриологических условий. Технология обустройства специальными дорожными мониторинговыми стационарными постами и устройствами и их размещение на ключевых участках в различных инженерно-геокриологических условиях позволит своевременно и качественно выполнять эти работы. Информация, получаемая и анализируемая с этих постов (изменение водно-теплового режима, развитие процессов в полосе отвода, микродеформации дорожной одежды и др.) позволит осуществлять контроль состояния дорожной конструкции и динамику ряда параметров на ранней стадии их развития, разработать и применить превентивные мероприятия для корректировки и поддержания мерзлотно-грунтовых условий дороги. Важнейшей составной частью общей системы мониторинга состояния автомобильных дорог криолитозоны должен быть их геотехнический мониторинг.

Геотехнический мониторинг на многолетнемерзлых грунтах – это комплекс работ, основанный на натуральных наблюдениях за состоянием грунтов основания (температурный режим), гидрогеологическим режимом, функционированием термостабилизаторов, перемещением конструкций фундаментов вновь возводимого, реконструируемого и эксплуатируемого сооружения (*ОДМ 218.2.091-2017, СП 305.1325800.2017*).

Целью геотехнического мониторинга автомобильных дорог является обеспечение их безопасной эксплуатации за счет своевременного выявления изменений контролируемых параметров конструкций и грунтов оснований, которые могут нарушить устойчивость автодорог.

Основными объектами геотехнического мониторинга являются: автомобильная насыпь, дорожные покрытия, объекты инфраструктуры дороги, искусственные сооружения (мосты, водопропускные трубы), опасные криогенные процессы и сезонно- и многолетнемерзлые грунты основания дороги и прилегающей территории.

Площадки мониторинга необходимо расположить с учётом оценки оптимального количества сложных геокриологических условий территории с набором максимально неблагоприятных природных компонентов для эксплуатации автодороги.

На площадке геотехнического мониторинга устанавливаются контрольно-измерительные оборудования, которые фиксируют, накапливают и передают данные о различных параметрах природной среды (рисунок 1).

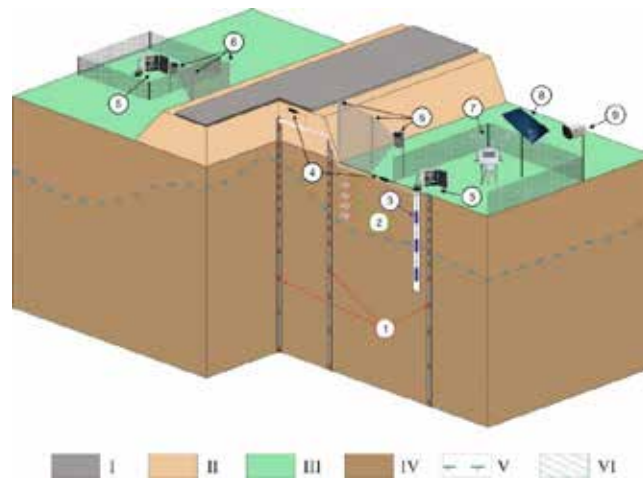


Рисунок 1. План оборудования поста геотехнического мониторинга на автодороге. Условные обозначения: I – асфальтобетонное покрытие автодороги; II – насыпь автодороги; III – почвенно-растительный слой придорожной полосы; IV – грунт; V – верхняя граница многолетнемерзлых грунтов; VI – сезонно- и многолетнемерзлые грунты; 1 – термометрические скважины, оборудованные термокосами; 2 – датчики влажности грунта; 3 – гидрогеологическая скважина, оборудованная пьезометрическими датчиками; 4 – датчики плотности теплового потока; 5 – модуль сбора данных; 6 – снегомерные рейки и фотоловушка для фиксации высоты снега; 7 – стационарная метеорологическая станция; 8 – солнечная панель для питания оборудования; 9 – камера видеонаблюдения.

На оборудованном таким образом посту геотехнического мониторинга создается система наблюдения и контроля за следующими параметрами: температурный и влажностный режим грунтов, плотность теплового потока, гидрогеологические и метеорологические наблюдения, деформации дорожного полотна и насыпи, а также динамика развития криогенных процессов (ОДМ 218.11.007-2023).

Таким образом, в условиях меняющегося климата контроль состояния мерзлотных условий, их динамики, является важнейшим фактором для разработки и проведения превентивных мероприятий и обеспечения устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне.

Литература

- ОДМ 218.2.091-2017 Геотехнический мониторинг сооружений инженерной защиты автомобильных дорог. – М., Росавтодор, 2017. – 91 с.
- ОДМ 218.11.007-2023 Методические рекомендации по организации инженерно-геокриологического мониторинга и оборудованию инженерно-геокриологических мониторинговых стационарных постов в полосе отвода автомобильных дорог в криолитозоне. – М., Росавтодор, 2023. – 169 с.
- СП 305.1325800.2017 Здания и сооружения правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве. – М., 2017. – 61 с.

РАСЧЕТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ С ГРУНТОВОЙ СРЕДОЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

О.В. Трифонов^{1*}, И.В. Ряховских¹, В.М. Ефимов², К.Н. Большев²

1 – ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская обл., Россия

2 – АО «ЯкутПНИИС», г. Якутск, Россия

**O.Trifonov@vniigaz.gazprom.ru*

Аннотация. В данной работе на основе синтеза вычислительных методов термодинамики, механики сплошной среды, механики конструкций, вычислительной математики разработана методика прогнозирования теплового режима взаимодействия подземного МГ с окружающим грунтом, эволюции его пространственного положения и напряженно-деформированного состояния.

Разработанные расчетные модели применены для прогнозирования развития опасных геокриологических процессов по трассе МГ «Сила Сибири». Результаты расчета включают историю изменения температурных полей в грунте вокруг трубопровода на рассматриваемом интервале времени, эволюцию просадок/пучений грунта, изменение во времени параметров напряженно-деформированного состояния. Применение критериев предельных состояний трубопровода позволяет выполнить ранжирование участков по степени опасности и создает базис для разработки компенсирующих мероприятий.

Ключевые слова: магистральный газопровод, опасные инженерно-геокриологические процессы, напряженно-деформированное состояние, прочность, критерий опасности, численное моделирование.

NUMERICAL PREDICTION OF THERMO-MECHANICAL INTERACTION OF UNDERGROUND GAS PIPELINES WITH GROUND ENVIRONMENT IN PERMAFROST ZONE

O.V. Trifonov^{1*}, I.V. Ryakhovskikh¹, V.M. Efimov², K.N. Bolshev²

1 – LLC «GAZPROM VNIIGAZ», Moscow region, Russian Federation

2 – JSC «YAPNIIS», Yakutsk, Russian Federation

**O.Trifonov@vniigaz.gazprom.ru*

Abstract. In this work, on the basis of computational methods of thermodynamics, continuum and structural mechanics a methodology for predicting of thermal interaction of underground gas pipeline with of the surrounding soil, the evolution of its spatial position and the stress-strain state has been developed.

The developed numerical models are applied for prediction of evolution of hazardous geocryological processes along the route of the main gas pipeline “Power of Siberia”. The numerical results include the history of temperature field changes in soil around the pipeline over the considered time interval, the evolution of subsidences/heaves, the evolution of stress-strain state parameters in time. The use of the limit state criteria allows to carry out pipeline sections ranking in terms of significance levels and creates a basis for development of compensating measures.

Keywords: main gas pipeline, hazardous geocryological engineering processes, stress-strain state, strength, hazard criterion, numerical simulation.

Значительное число проектируемых и строящихся в настоящее время магистральных газопроводов (МГ) находятся в районах со сложными природно-климатическими и геокриологическими условиями. Строительство и эксплуатация МГ вызывают изменения в естественном температурном режиме грунтов криолитозоны. При отрицательной температуре перекачиваемого газа возможно возникновение сезонного/прогрессирующего промерзания талых грунтов, окружающих трубопровод. Такие процессы в сочетании с притоком влаги к зоне промерзания могут приводить к пучению грунтов. При положительной температуре перекачиваемого газа происходит оттаивание мерзлого грунта вокруг трубопровода. Оттаявший грунт дает значительные осадки, величина которых зависит от начальной льдистости, типа и физических характеристик грунта. И просадки, и

пучения грунтов, непосредственно окружающих трубопровод, приводят к изменению его напряженно-деформированного состояния.

При выборе трассы МГ как правило невозможно избежать участков с опасными природными проявлениями (Ряховских, 2022; Трифонов и др., 2020). В связи с этим одним из основных аспектов обеспечения эксплуатационной безопасности объектов магистральных газопроводов является расчетное прогнозирование развития опасных геокриологических процессов вдоль трассы газопровода и их влияния на линейные сооружения МГ.

Прогнозирование влияния геокриологических процессов на объекты МГ может осуществляться на основе расчетных моделей теплового и механического взаимодействия трубопровода с грунтовой средой, использующих данные о климатических, геокриологических условиях и процессах, конструктивных и технологических параметрах МГ, мониторинга его пространственного положения (Трифонов и др., 2020; Трифонов и др., 2021) (рис.1).

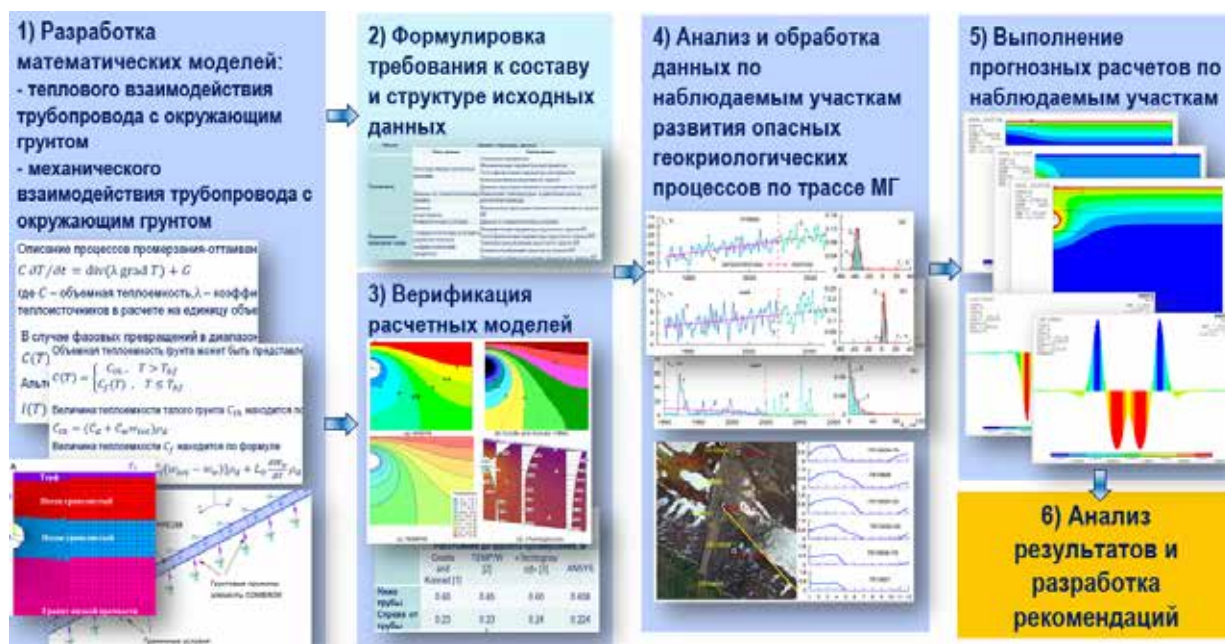


Рисунок 1. Алгоритм решения задачи прогнозирования влияния геокриологических процессов на НДС участков магистрального газопровода.

Для решения задачи теплового взаимодействия трубопровода с грунтом в условиях фазовых переходов и изменения влажностного режима грунтов в данной работе использована энтальпийная формулировка нестационарной задачи теплопроводности (Ершов, 1999), реализованная в двумерной постановке методом конечных элементов. Граничные условия учитывают непрерывное изменение природно-климатических условий на

поверхности грунта, а также изменение температурных режимов транспортировки газа (Трифонов и др., 2020).

Развитие просадок/пучений грунта моделировалось на основе полученных результатов эволюции температурных полей, зон промерзания/протаивания грунта под трубой с использованием характеристик просадочности и пучинистости грунтов.

Изменение во времени напряженно-деформированного состояния трубопровода моделировалось на основе пространственной балочной модели с учетом больших перемещений, деформаций и пластического поведения материала трубопровода (Трифонов и др., 2020; Trifonov et al., 2013). Взаимодействие трубопровода с окружающим грунтом описано с помощью элементов нелинейных связей («грунтовых пружин»), помещенных в узлах балочной модели трубопровода.

В процессе выполнения работы сформулированы требования к составу и структуре исходных данных, необходимых для выполнения расчетных исследований, разработан алгоритм расчета, осуществлена реализация расчетных моделей в программном комплексе, проведена верификация расчетных моделей на основе известных решений модельных задач. Выполнены расчеты по характерным участкам МГ «Сила Сибири», включающие прогноз эволюции просадок и анализ параметров НДС на рассматриваемом интервале времени.

Результаты расчета участков с характерными свойствами показывают, что в процессе эксплуатации МГ при заданных температурах перекачки газа на расчетном интервале может происходить растепление грунта и развитие просадок. Полученные результаты позволяют ранжировать участки по прогнозируемой опасности и разработать мероприятия, снижающие воздействие опасных геокриологических процессов на объекты МГ.

Литература

Основы геокриологии. Ч.5. Инженерная геокриология / Под ред. Э. Д. Ершова. – М. : Изд-во МГУ, 1999 – 526 с.

Ряховских, И. В. Безопасная эксплуатация газопроводов на базе модели управления коррозионным растрескиванием под напряжением / И. В. Ряховских // Вести газовой науки. – 2022. – № 1 (50). – С. 17–30.

Трифонов, О. В., Силкин, В. М., Черний, В. П., Морин, И. Ю., Володин, П. А., Ефимов, В. М., Большев, К. Н. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода «Сила Сибири» на участках развития опасных инженерно-геокриологических процессов на основе математических моделей/ О. В. Трифонов [и др.] // Вести газовой науки. 2020 № 2 (44) – С. 34-50.

Трифонов О.В., Морин И.Ю., Володин П.А., Рассохина А.В. Принципы классификации участков по прогнозируемой опасности для магистральных газопроводов, расположенных в зонах развития опасных инженерно-геокриологических процессов / О. В. Трифонов [и др.] // Наука и техника в газовой промышленности. – 2021 – № 2 – С. 82–98.

Trifonov, O. V., Cherniy, V. P. Fault impact on buried steel pipelines: modeling and analysis. In: Advances in Engineering Research. Vol. 7. Ed. Victoria M. Petrova. Nova Publishers: New York, 2013. 277 p.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛООВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

А.А. Филимонов*

АО «ТомскНИПИнефть», г. Томск, Россия

*FilimonovAA@tomsknipi.ru

Аннотация. Исследование включало в себя установление проблематики восстановления геологического профиля трассы трубопровода. Были выбраны различные методики моделирования геологической обстановки в программном обеспечении и разработаны 30 расчетных моделей в двух комплексах, проведено сравнение и оценка результатов теплотехнических расчетов. Проведены последующие прочностные расчеты для всех результатов тепловых расчетов, установлена критичность изменения факторов на прочностные характеристики трубопровода. Выделены положительные и отрицательные стороны моделирования каждой методики, отмечены наиболее корректные полученные результаты.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, подземный трубопровод, тепловое моделирование.

ANALYSIS OF THE RESULTS OF THERMAL MODELING OF UNDERGROUND LINEAR PIPELINES IN THE ZONE OF PERMAFROST SOILS

A.A. Filimonov*

JSC «TomskNIPIneft», Tomsk, Russia

*FilimonovAA@tomsknipi.ru

Abstract. The study included the identification of the problem of restoring the geological profile of the pipeline route. Various methods of modeling the geological situation in software were chosen and 30 calculation models were developed in two complexes, a comparison and evaluation of the results of thermal engineering calculations were carried out. Subsequent strength calculations were carried out for all the results of thermal calculations, the criticality of the change in factors on the strength characteristics of the pipeline was established. The positive and negative aspects of modeling each technique are highlighted, the most correct results obtained are noted.

Keywords: permafrost, underground pipeline, thermal modeling.

Основной задачей при вскрытии многолетнемерзлых грунтов (ММГ) по трассе проектируемого трубопровода является корректная оценка изменения геокриологических условий при техногенном воздействии.

Проблематика проектирования трубопроводов в ММГ изучалась рядом ученых (*Опыт...*, 2012; *Прогнозирование...2020*; *Прогнозирование...2020*, Cao Y et al., 2021; *Fei Wang et al.*, 2019; *Golik V. V. et al.* 2019; *Yanhu et al.*, 2020). Подавляющее большинство расчетных подходов по учету теплового воздействия на мерзлый грунт рассчитывается в двумерной постановке с применением типизирования грунтовых условий или выделения наиболее опасных участков протяженной трассы, что, по мнению автора, является упущением. В связи с этим, сотрудниками АО «ТомскНИПИнефть» была принята концепция комплексного подхода к численным расчетам подземных трубопроводов в криолитозоне (*Проектирование...*, 2021).

Однако для теплотехнических расчетов одной из основных проблем является неопределенность исходных данных – отсутствие измерений температуры талых грунтов, участвующих в процессах теплообмена, ограниченная глубина геологических выработок, неоднозначность положения фронта многолетнемерзлых грунтов.

Целью работы является применение различных методик задания исходных данных для теплотехнических расчетов и сравнение влияния результатов расчетов теплового состояния

на напряженно-деформированное состояние (НДС) трубопровода, определение критичности факторов и неопределенности исходных данных.

Исследование проведено в 2022-2023 годах в АО «ТомскНИПИнефть» и включало в себя установление проблематики восстановления геологического профиля трассы трубопровода, выбор методик моделирования геологической обстановки (литологического строения профилей трассы, температурных полей) в программном обеспечении (ПО) для проведения сравнительного анализа, разработку расчетных моделей (РМ), сравнение и оценку результатов теплотехнических расчетов, установление критичности изменения факторов на прочностные характеристики трубопровода путем проведения расчетов прочности трубопровода.

Таблица 1

Перечень расчетных моделей

Условия задания расчетной модели (РМ)		С граничным условием 2 рода на нижней границе РМ			С граничным условием 1 рода на нижней границе РМ
		20 метров	30 метров	40 метров	40 метров
Тепловая изоляция толщиной 62,5 мм	С температурой талых грунтов 1,0 °С	РМ № 1	РМ № 2	РМ № 9	РМ № 13
	С температурой талых грунтов 0,5 °С	РМ № 2	РМ № 6	РМ № 10	РМ № 14
	С температурой талых грунтов 0,05 °С	РМ № 3	РМ № 7	РМ № 11	РМ № 15
	С температурным распределением в зоне фронта ММГ	РМ № 4	РМ № 8	РМ № 12	–
Установка локальных сезоннодействующих охлаждающих устройств на границах ММГ	С температурой талых грунтов 1,0 °С	РМ № 16	РМ № 20	РМ № 24	РМ № 28
	С температурой талых грунтов 0,5 °С	РМ № 17	РМ № 21	РМ № 25	РМ № 29
	С температурой талых грунтов 0,05 °С	РМ № 18	РМ № 22	РМ № 26	РМ № 30
	С температурным распределением в зоне фронта ММГ	РМ № 19	РМ № 23	РМ № 27	–

Для проведения теплотехнических расчетов в исследовании использовалось ПО «Frost 3D», для проведения прочностных расчетов трубопровода использовалось ПО «СТАРТ-Проф» (рис. 1).

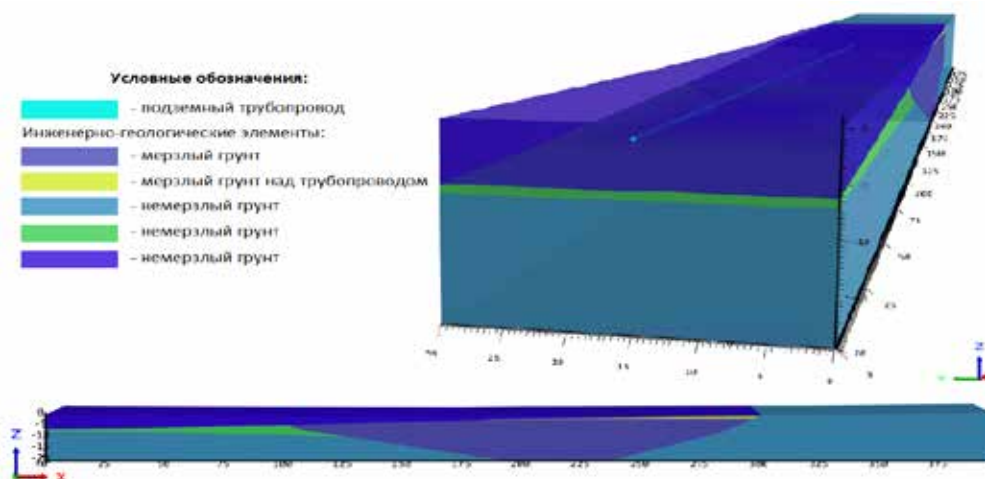


Рисунок 1. Продольный профиль трубопровода в расчетном ПО.

Выводы

1. Различия в профилях осадки мерзлого грунта при оттаивании на участках трассы с островной мерзлотой отмечены, в основном, на границах перехода талого и мерзлых грунтов.

2. Использование граничного условия 1 рода применимо, но требует дополнительного анализа первичных результатов теплотехнических расчетов. Предпочтительно использование граничного условия 2 рода на нижней границе расчетной области.

3. Высоту расчетной модели стоит принимать не менее 40 метров для исключения дополнительных теплонакоплений в пространстве расчетной модели. При применении температуры талых грунтов $1,0^{\circ}\text{C}$, распространение температурных изолиний в пространстве расчетной модели удовлетворяет предпосылкам о неизменности температур ниже глубины нулевых амплитуд.

4. Любые полученные результаты теплотехнических расчетов подземного трубопровода требуется учитывать при последующей проверке прочностных условий трубопровода для подтверждения механической безопасности объекта.

Литература

Опыт применения программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния нефтепроводов, прокладываемых на вечномерзлых грунтах / М. Ю. Зотов, И. В. Ушаков, И. Л. Димов, А. О. Олейникова // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 2 (6). – С. 61–65. – EDN OZDKVL.

Прогнозирование напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода "Сила Сибири" на участках развития опасных инженерно-геокриологических процессов на основе математических моделей / О. В. Трифонов, В. М. Силкин, В. П. Черный [и др.] // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2020. – № 2 (44). – С. 34–50. – EDN DNEBPK.

Проектирование промышленных подземных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах с использованием современных комплексов проектирования / А. А. Филимонов, Д. В. Липихин, А. Е. Мельников, К. В. Кирьянова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2021. – Т. 23. – № 4. – С. 127–137. – DOI 10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137. – EDN QRGQDC.

Прогнозирование напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода "Сила Сибири" на участках развития опасных инженерно-геокриологических процессов на основе математических моделей / О. В. Трифонов, В. М. Силкин, В. П. Черный [и др.] // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2020. – № 2 (44). – С. 34–50. – EDN DNEBPK.

Cao Y, Li G, Wu G, Chen D, Gao K, Tang L, Jia H, Che F. Proposal of a New Method for Controlling the Thaw of Permafrost around the China–Russia Crude Oil Pipeline and a Preliminary Study of Its Ventilation Capacity. *Water*. 2021; 13(20):2908. <https://doi.org/10.3390/w13202908>.

Fei Wang, Guoyu Li, Wei Ma, Qingbai Wu, Mihaela Serban, Samsonova Vera, Fedorov Alexandr, Ningshan Jiang, Bo Wang, Pipeline–permafrost interaction monitoring system along the China–Russia crude oil pipeline. *Engineering Geology*, Volume 254, 2019, Pages 113-125, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.013>.

Golik V. V. et al. Modeling the heat transfer processes in the pipe-soil system //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 663. – №. 1. – С. 012012.

Yanhu, M.; Guoyu, L.; Wei, M.; Zhengmin, S.; Zhiwei, Z.; Wang, F. Rapid permafrost thaw induced by heat loss from a buried warm-oil pipeline and a new mitigation measure combining seasonal air-cooled embankment and pipe insulation. Energy 2020, 203, 117–119.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ЗДАНИЯ С ВЫСОКИМ ПРОВЕТРИВАЕМОМ ПОДПОЛЬЕМ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКАНСКОЙ БОЛЬНИЦЫ № 1)

А.А. Чжан^{1*}, П.С. Заболотник¹, Р.В. Чжан¹, Т.Р. Чжан², А.Д. Набережный¹

1 – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

2 – Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

**zhang0993@ya.ru*

Аннотация. Приводятся результаты термометрических исследований грунтов основания здания Республиканской больницы № 1 с высоким проветриваемым подпольем. За почти 30 лет эксплуатации здания наблюдается понижение температуры грунтов на глубине 10 м несмотря на изменение климата в сторону повышения температуры воздуха.

Ключевые слова: температурный режим грунтов, проветриваемое подполье, изменение климата.

FEATURES OF THE FORMATION OF THE TEMPERATURE REGIME OF THE SOILS OF THE BASE OF A BUILDING WITH A HIGH VENTED CRAWL SPACE (ON THE EXAMPLE OF THE REPUBLICAN HOSPITAL NO. 1)

A.A. Zhang^{1*}, P.S. Zabolotnik¹, R.V. Zhang¹, T.R. Zhang², A.D. Naberezhnyi¹

1 – Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

2 – M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

**zhang0993@ya.ru*

Abstract. The results of thermometric studies of the soils of the foundation of the building of the Republican Hospital No. 1 with a high vented crawl space are presented. For almost 30 years of the building operation, there has been a decrease in soil temperature at a depth of 10 m, despite climate change towards an increase in air temperature.

Keywords: soils temperature regime, vented crawl space, climate change.

При эксплуатации социально значимых объектов, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, необходим регулярный контроль за состоянием грунтов основания и фундамента зданий и сооружений. Одним из таких объектов является комплекс зданий Республиканской больницы № 1 – Национального центра медицины («РБ№ 1– НЦМ») г. Якутска, эксплуатируемый с 1993 г. по I принципу. Одной из отличительных особенностей здания клинико-диагностического центра, входящего в состав «РБ№ 1 – НЦМ» – проветриваемое подполье высотой 4.5–5 м, которое значительно превосходит принятую высоту в пределах 1.2–2 м (рис. 1). На примере данного здания, начиная с 2021 года, Институт мерзлотоведения в рамках бюджетного финансирования по теме «Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов» проводит исследования динамики температурного поля грунтов основания в процессе эксплуатации в условиях изменения климата.

В геоморфологическом отношении территория «РБ№ 1 – НЦМ» расположена в пределах второй Сергеляхской левобережной надпойменной террасы р. Лены в долине Туймаада в пределах южной части Большого Якутска. Геологический разрез участка сложен верхнечетвертичными аллювиальными отложениями, представленными глинистыми и песчаными грунтами. Мерзлотные условия участка характеризуются сплошным распространением многолетнемерзлых грунтов со сливающимся слоем сезонного оттаивания (Мельников, 1963). Криогенная текстура песчаных мерзлых грунтов массивная, глинистых – преимущественно слоистая.



Рисунок 1. Проветриваемое подполье клинико-диагностического центра высотой 4,5–5 м.

С начала эксплуатации с 1993 по 2008 гг. термометрические исследования проводили один-два раза в год. До 2021 г. исследования по субъективным причинам были приостановлены. За это время часть наблюдательных скважин была выведена из строя. На 2023 г. в распоряжении находятся 10 скважин глубиной от 6 до 12 м. В скважинах, расположенных вдоль СВ стены здания (Скв. А; Б и В) температуры грунтов на глубинах 10–12 м изменяется от -2 до -3.4 °С, в центральной части здания (Скв. И; Ж; З) – от -2.8 до -3.5 °С, а вдоль южного контура (Скв. Д; Е) – от -1.4 до -1.6 °С. Скважина Г глубиной 5 м, расположенная в районе надземного перехода между клинико-диагностическим и сервисным центрами, при всех измерениях фиксировала наличие талых грунтов (рис. 2).

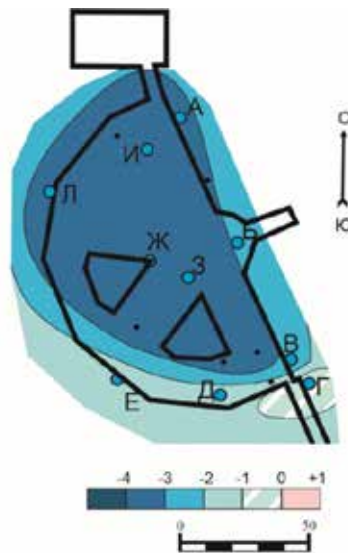


Рисунок 2. Температурное поле на глубине 10 м в основании зданий клинико-диагностического центра «РБ№ 1 – НЦМ» с высоким проветриваемым подпольем в августе 2022 г.

Ранее в апреле 2008 г. ОА «ЯкутГИСИЗ» проводил аналогичные исследования. Результаты этих исследований в сравнении с более поздними данными (май 2021 г.), позволяют утверждать, что за этот период эксплуатации произошло понижение температуры грунтов основания почти на 1 °С, несмотря на повышение средней годовой температуры наружного воздуха.

Помимо это было измерено распределение температуры воздуха по высоте проветриваемого подполья. Также в эти работы входили исследования аэродинамических характеристик воздушной массы в проветриваемом подполье, которые включали в себя направление и скорость движения с помощью цифрового портативного анемометра. В результате этих работ было установлено, что движение воздушной массы под всем контуром здания минимально, а температура совпадает с температурой воздуха вне контура здания на момент замеров. Таким образом, при эксплуатации такого типа зданий не возникает давления в проветриваемом подполье из-за разницы температуры вне и под ним, необходимого для естественного вентилирования. Охлаждение грунтов основания происходит за счет затенения поверхности в летнее время и отсутствия снега зимой.

Визуальными наблюдениями при инженерно-геологической рекогносцировке, проведенными в мае 2020 г. как следствие отсутствия стока, зафиксирован заболоченный участок длиной около 100 м и шириной 20 м. Также выявлены такие процессы, как выпучивание, морозобойное растрескивание дорожного полотна. В районе наземного перехода между клинико-диагностическим и сервисным центрами, где сформировался талик, наблюдаются деформации с различной амплитудой: места примыкания лестничных конструкций к зданию – амплитуда до 17,7 мм, наземный переход – 19 мм.

Таким образом, возобновленные термометрические исследования показали, что грунты основания здания Республиканской больницы № 1 находятся в стабильном состоянии и даже продолжают охлаждаться. Данное здание – одно из немногих на территории г. Якутска, которое имеет столь высокое проветриваемое подполье, которое позволяет эффективно использовать имеющееся пространство для различных нужд: от проведения сервисных работ до организации автомобильной стоянки. Это позволяет утверждать, что при нормальной эксплуатации зданий с проветриваемым подпольем, влияние глобальных изменений (повышения) температуры воздуха на первых этапах (циклах) потепления не приводит к растеплению грунтов в основании. Как показывают исследования, за счет затеняющего эффекта и работы проветриваемого подполья происходит понижение температуры грунтов в основании, что благотворно сказывается на устойчивости зданий.

Литература

Мельников П.И. Итоги геокриологических, гидрогеологических и инженерно-геологических исследований в Центральной и Южной Якутии / П.И. Мельников. – Москва: Изд-во АН СССР, 1963. – 84 с.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОГРАЖДАЮЩЕЙ ДАМБЫ Г. ЯКУТСКА НА УЧАСТКЕ № 3

Р.В. Чжан, А.А. Якимов*, А.А. Чжан

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

**yakimovaa.mpi@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследования геокриологических условий участка ограждающей дамбы г. Якутска. По результатам исследований установлено, что основание дамбы представлено тальми аллювиальными песчаными отложениями разной степени водонасыщения. Сброс теплой воды ЯТЭЦ в пруд-охладитель оказывает значительное отепляющее влияние. По этой причине температура грунтов на глубине 10 м изменяется в пределах от +6 до +6.4 °С. С помощью метода электротомографии эффективно оконтурены фильтрационные зоны в теле грунтовой дамбы и произведена оценка глубины залегания кровли многолетнемерзлых пород в основании сооружения.

Ключевые слова: криолитозона, дамба, природно-техническая система, фильтрация, устойчивость гидротехнического сооружения, инженерно-геологические условия, геофизические исследования.

CURRENT STATE OF YAKUTSK PROTECTIVE DAM ON THE SITE NO. 3

R.V. Zhan, A.A. Yakimov*, A.A. Zhang

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

**yakimovaa.mpi@yandex.ru*

Abstract. The results of the study of geocryological conditions of the site of Yakutsk protective dam are presented. According to the research results, it was found that the base of the dam is represented by thawed alluvial sand deposits of varying degrees of water saturation. The discharge of warm water by YaCHP into the cooling pond has a significant warming effect. For this reason, the soil temperature at a depth of 10 m varies from +6 to +6.4 °C. Using the method of electrotomography, filtration zones in the body of a soil dam were effectively contoured and the depth of the permafrost table at the base of the structure was estimated.

Keywords: permafrost, dam, natural and technical system, seepage, stability of hydraulic structures, engineering and geological conditions, geophysical investigations.

Часть территории г. Якутска ежегодно подвергается подтоплению во время весенних паводков. Для исключения и минимизации негативных последствий, в 2001 г. был разработан первый проект ограждающей дамбы общей протяженностью 14.6 км. Гидроузел отнесен к II классу капитальности. Наибольшую опасность, как показала эксплуатация, вызывает устойчивость участка № 3 протяженностью 1330 м от городской дамбы 202 микрорайона до Речного порта, таким образом формируя закрытый пруд-охладитель ЯТЭЦ. Во время эксплуатации защитная дамба на этом участке неоднократно подвергалась разрушению во время прохождения паводков в местах ее примыкания к городской дамбе 202 микрорайона и водопропускному сооружению. Кроме этого, тело дамбы было подвержено эрозионным процессам от атмосферных осадков. В разные годы были сделаны попытки реализации нескольких предложений повышения статической и фильтрационной устойчивости дамбы (проекты в 2010-2011 гг. ОАО РПИИ «Якутпроект» и ЗАО «Сибречпроект»), но ни один проект не был реализован до конца и не учитывал геокриологические условия строительной площадки.

Рассматривая дамбу как природно-техническую систему, следует отметить сложность процессов, происходящих в сооружении при взаимодействии её с окружающей средой. К ним относятся специфические условия теплообмена гидроузла с окружающей средой (наличие дополнительного источника тепла – сброс горячих вод ЯТЭЦ в пруд-охладитель), гидрогеологический режим работы гидроузла (дамба фильтрует весной в пруд-охладитель со стороны городской протоки р. Лена, зимой – в обратном направлении) и, наконец, сложные геокриологические условия створа – неопределенность мощности талика в основании (*Отчет..., 2021*).

По просьбе «Исполнительной дирекции по водному хозяйству и организации восстановительных работ по ликвидации последствий паводков в Республике Саха (Якутия)» в 2020-2021 гг. Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН выполнил исследования для уточнения инженерно-геокриологических условий, которые включали бурение (скважина глубиной 40.1 м) и геофизические методы. В результате бурения было установлено, что сверху до глубины 11-12 м залегают насыпные талые грунты дамбы (разнозернистые и пылеватые пески с примесью щебня, гальки). Мощность сезонно-талого слоя составляет 3.5–4.0 м. Многолетнемерзлые породы вскрыты на глубине 31.0 м, то есть глубина залегания мерзлой толщи на участке бурения составила порядка 20 м от подошвы слоя насыпных грунтов дамбы. Температура на забое на момент исследований составила -0.5°C .

Геофизические исследования методом электротомографии были проведены с целью оценки глубины залегания кровли коренных многолетнемерзлых пород в основании дамбы и уточнения характера фильтрационного режима сооружения. Эффективная глубина исследований составила 50 м.

Геoeлектрические разрезы по гребню и низовой берме дамбы имеют трехслойное строение. По результатам интерпретации, верхний слой мощностью от 12 до 15 м сложен тальми (сезонно-мерзлыми) насыпными грунтами тела ГТС и рыхлыми отложениями без признаков обводнения ($УЭС$ 1200–4000 Ом·м). Нижележащий слой представлен аллювиальными песчаными отложениями с высокой степенью водонасыщения грунтовыми водами ($УЭС$ 150–600 Ом·м). Низкоомное основание разрезов характеризуется наименьшими значениями $УЭС$, не превышающими 150 Ом·м, и, согласно априорной инженерно-геологической информации (Нерадовский, 2019; 2021), представлено толщей коренных многолетнемерзлых пород.

В результате сопоставления уровня $УЭС$ на геoeлектрическом разрезе по профилю вдоль гребня дамбы с данными по опорной скважине, вскрывшей многолетнемерзлое основание, произведено оконтуривание кровли ММП на всем протяжении профиля исследований. Признаком наличия фильтрационных процессов на геoeлектрических разрезах является понижение значений $УЭС$ на локальных участках в диапазоне глубин 7–15 м от поверхности. Фильтрационные зоны в створе бермы ГТС проявляются более контрастно и на меньших глубинах, чем по гребню.

На основании проведенных исследований были сделаны следующие выводы и предложены практические предложения по обеспечению статической и фильтрационной устойчивости оградительной дамбы на участке № 3:

- в настоящий период оградительная дамба на участке № 3 (г. Якутск) находится в предельном состоянии и требует реконструкции по обеспечению статической и фильтрационной устойчивости;
- проведенные геофизические исследования (метод электротомографии) показали свою эффективность при выявлении локальных фильтрационных зон в теле дамбы и определении верхней границы ММП в основании (30–40 м);
- особое внимание следует уделить инженерно-геокриологическим, гидрогеологическим условиям створа гидроузла, которые должны быть положены в основу многовариантного проектирования с использованием методов моделирования статической и фильтрационной устойчивости гидроузла в целом;
- учитывая сложный характер теплообмена в пруде-охладителе ЯТЭЦ (постоянный сброс горячей воды), окончательное конструктивное решение противofильтрационного устройства принять на основе существующего опыта строительства и эксплуатации и экологической безопасности подобных гидроузлов в криолитозоне, а именно – использовать вяжущие средства на основе гелей, глиноцемента или цемента.

В заключение отметим, что в настоящее время авторитетной организацией в России в области регулирования русел АО «Ленгипроречтранс» разрабатывается новый проект защитной дамбы протяженностью 71 км от Табагинского до Кангаласского мысов. Проект включает регулирование русла р. Лены. На участке № 3 у г. Якутска конструкция оградительной дамбы запроектирована с учётом рекомендаций Института мерзлотоведения СО РАН.

Литература

Нерадовский Л.Г. Статистика удельного электрического сопротивления мёрзлых рыхлых отложений и осадочных пород долины реки Лены «Туймаада» // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2019. – 27 (2). – С. 49–55. DOI:10.31242/2618-9712-2019-24-2-4

Нерадовский Л.Г. Опыт изучения методом ВЭЗ геоэлектрического строения долины реки Лены «Туймаада» // Вестник евразийской науки. – 2021. – 13(6). <https://esj.today/PDF/25ECVN621.pdf>. DOI: 10.15862/25ECVN621

Отчет о работе по х/д 5/21 «Обработка материалов инженерно-геологических исследований на объекте: Участок № 3 гидротехнического сооружения «Инженерная защита от паводковых вод г. Якутска» / Научный рук. Р.В. Чжан. – Якутск: ИМЗ СО РАН; 2021. – 68 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СНЕГОЗАНОСА В ПРОВЕТРИВАЕМОМ ПОДПОЛЬЕ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ СООРУЖЕНИЙ

Д.В. Чуржакова*

АО «ТомскНИПИнефть», г. Томск, Россия

* churzhakovadv@gmail.com

Аннотация. На сегодняшний день нет нормативно зафиксированной методики задания снежного покрова для выполнения прогнозных теплотехнических расчетов сооружений с проветриваемым подпольем. В данной работе рассмотрены разные варианты задания снежного покрова для сооружений с проветриваемым подпольем с размерами в плане более 3 м и резервуаров диаметром до 25 м. По результатам расчёта определено, что высота снежного покрова влияет на результаты расчета, при использовании различных методик снегозанося наблюдается разница температур грунтов на одинаковых глубинах, на глубине ниже 11 м изменения температур грунтов основания для всех моделей незначительны. Наиболее «реалистичными» являются схемы задания снегозанося: внутри подполья высота снегозанося принимает сокращенное от нормативного значение, а вблизи 2 м от периметра сооружения – увеличенное; внутри подполья площадь сооружения разделяется на 3 зоны масштабированием периметра относительно центральной точки сооружения в плане на 1/3, 2/3, 3/3 с увеличением приложения снегозанося от центра к периферии.

Ключевые слова: снеговой покров, проветриваемое подполье, прогнозный теплотехнический расчет.

STUDY OF THE INFLUENCE OF SNOW COVER IN A VENTILATED SUBFIELDS ON THE TEMPERATURE REGIME OF SOILS OF THE BASE OF STRUCTURES

D.V. Churzhakova*

JSC «TomskNIPIneft», Tomsk, Russia

* churzhakovadv@gmail.com

Abstract. To date, there is no legally documented method of determining snow cover for carrying out of forecast heat of structures with ventilated underground. In this paper different variants of assignment of snow cover are considered for structures with ventilated underground with dimensions of more than 3 meters and tanks up to 25 meters in diameter. The calculation determined that snow cover height influences the calculation, when using different methods for setting the snow height, a difference in soil temperatures is observed at the same depths, at a depth below 11 m, the changes in ground temperatures of all models are negligible. The most «realistic» are the schemes of the task of snow: inside the ventilated underground, the height of the snow takes short from the normative value, and 2 meters from the perimeter of the construction - increased; inside the ventilated underground, the structure is divided into 3 zones with the scaling of the perimeter relative to the central point of the structure in a plan of 1/3, 2/3, 3/3, with the increase of the snow depth application from the center to the periphery.

Keywords: snow cover, ventilated underground, thermotechnical calculation.

Одним из этапов проектирования зданий и сооружений в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) является выполнение прогнозных теплотехнических расчетов (ТТР), в результате чего определяется температурное распределение в основании проектируемого сооружения на заданный временной промежуток. При задании расчетной модели учитывается высота снежного покрова, влияющая на поступление холода в зимний период в толщу грунта, но в нормативной документации не представлены методики задания снежного покрова для выполнения ТТР-сооружений с проветриваемым подпольем (РСН 67-87. Инженерные ..., 1988; СП 25.13330.2020. Основания ..., 2021).

Глобально все здания и сооружения с проветриваемым подпольем разделяются на 4 группы: шириной менее 3 м, с габаритными размерами в плане более 3 м, надземные резервуары диаметром до 25 м и более 25 м. В результате анализа существующих мнений были выделены 7 схем задания снеготаноса, предназначенных для конкретных групп сооружений. В работе рассматривается 2 группы с наибольшими конструктивными различиями и 5 соответствующих им схем задания снеготаноса. Вариативность использования разных методик сведена в матрицу расчетных моделей (табл. 1). Для каждой из рассматриваемых групп было выбрано опытное сооружение, не предусматривающее применение термостабилизации по проекту.

Таблица 1

Матрица расчетных моделей

Методики (схемы) задания снеготаноса	Рассматриваемые сооружения с проветриваемым подпольем		
	с размерами в плане более 3 м	резервуары диаметром до 25 м	
НПО «Фундаментстройаркос»			
Внутри подполья высота снеготаноса $0,5 \cdot X$ м, вблизи 2 м от периметра сооружения (за его пределами) – $2 \cdot X$ м	PM1-1	PM2-1	
АО «ТомскНИПИнефть»			
Внутри подполья площадь сооружения разделяется на 3 зоны масштабированием периметра относительно центральной точки сооружения в плане на 1/3, 2/3, 3/3 с приложением снеготаноса высотой	$0,5 \cdot X$ м, $0,75 \cdot X$ м, X м соответственно	PM1-2	–
	$0,25 \cdot X$ м, $0,5 \cdot X$ м, $0,75 \cdot X$ м соответственно	–	PM2-2
Другие источники			
Внутри подполья высота снеготаноса $0,2 \cdot X$ м	PM1-3	PM2-3	
Внутри подполья (под сооружением) на расстоянии 1 м от периметра сооружения высота снеготаноса X м, на остальной площади внутри подполья – $0,2 \cdot X$ м	PM1-4	–	

X – нормативная высота снежного покрова, м.

При исследовании сооружений с габаритными размерами более 3 м рассматривалось здание длиной 35 м, шириной 15 м и высотой подполья 1,8 м. Для него были разработаны 4 идентичные расчётные модели (PM1-1, PM1-2, PM1-3, PM1-4) с различными схемами снеготранспорта. Под влиянием тренда глобального потепления, теплового влияния от здания и теплоизолирующего действия снегового покрова в пределах боковой поверхности сваи на глубине от 3 до 11 метров, разница результатов расчетов (табл. 2) на одинаковой глубине составила от 0,6 до 1,8 °С. Ниже 11 м результаты имеют высокую сходимость.

В качестве опытного сооружения для группы резервуаров диаметром до 25 м был выбран резервуар диаметром в плане 15,18 м и высотой подполья 1,2 м. Для него также были разработаны 3 расчетные модели (PM2-1, PM2-2, PM2-3). Результаты ТТР (табл. 2) определялись в центральной части резервуара и на периферии, вследствие чего было отслежено, что при постоянном снеготранспорте под всем сооружением температурное распределение отличается и принимает большее значение на периферии. Разница результатов расчетов на одинаковых глубинах для моделей резервуара составила от 0,5 до 1,2 °С.

Таблица 2

Результаты прогнозного теплотехнического расчета на 15.09.2045 г.

Расчетные температуры грунтов основания, °С											
Глубина замера, м	Модель задания снеготранспорта для расчета										
	Сооружения с проветриваемым подпольем с габаритными размерами в плане более 3 м				Надземные резервуары диаметром до 25 м						
					центр сооружения			периферия сооружения			
	PM1-1	PM1-2	PM1-3	PM1-4	PM2-1	PM2-2	PM2-3	PM2-1	PM2-2	PM2-3	
-2	0,9	2,6	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	0,5	-0,1	-0,2	
-3	-0,4	0,6	-1,2	-0,9	-0,8	-0,9	-1,5	-0,5	-0,5	-1,2	
-4	-0,4	-0,1	-1,6	-1,1	-0,9	-1,0	-2,1	-0,5	-0,5	-1,6	
-5	-0,4	-0,2	-1,6	-1,1	-0,8	-0,9	-2,1	-0,5	-0,5	-1,6	
-6	-0,4	-0,3	-1,4	-1,0	-0,7	-0,8	-1,9	-0,5	-0,5	-1,4	
-7	-0,5	-0,3	-1,2	-0,9	-0,6	-0,7	-1,6	-0,5	-0,5	-1,2	
-8	-0,5	-0,4	-1,1	-0,9	-0,6	-0,6	-1,3	-0,5	-0,5	-1,0	
-9	-0,5	-0,4	-1,0	-0,8	-0,5	-0,6	-1,2	-0,4	-0,5	-0,9	
-10	-0,5	-0,4	-1,0	-0,8	-0,5	-0,5	-1,0	-0,4	-0,5	-0,9	
-11	-0,5	-0,4	-0,9	-0,8	-0,5	-0,5	-0,9	-0,4	-0,4	-0,8	
-12	-0,5	-0,5	-0,9	-0,7	-0,5	-0,5	-0,8	-0,4	-0,4	-0,7	
-13	-0,5	-0,5	-0,8	-0,7	-0,4	-0,5	-0,8	-0,4	-0,4	-0,7	
-14	-0,6	-0,5	-0,8	-0,7	-0,4	-0,4	-0,7	-0,4	-0,4	-0,6	
-15	-0,6	-0,5	-0,8	-0,7	-0,4	-0,4	-0,7	-0,4	-0,4	-0,6	
Te, °С	-0,5	-0,3	-1,3	-0,9	-0,7	-0,8	-1,7	-0,5	-0,5	-1,3	
H, %	50	100	20	20	50	25	50	50	75	20	

Te – эквивалентная температура по боковой поверхности сваи, °С;

H – высота снега в точке съема результатов, в % от нормативного значения.

Для всех групп расчетов было характерно, что высота снежного покрова напрямую влияет на результаты ТТР (чем она больше, тем выше температуры грунта в основании сооружения), а также, что при выполнении расчетов влияние на результат оказывает не только снеготанос, расположенный в пределах точки съема данных, но и «соседствующий» с ним.

Данные температурных наблюдений на объектах, расположенных в тех же климатических условиях, что и исследуемые, и натурные наблюдения расчетных сооружений позволяют сделать вывод, что понижение эквивалентных температур без дополнительных мероприятий по термостабилизации не характерно и противоречит реальному изменению температур грунтов в период эксплуатации. Таким образом, для сооружений с проветриваемым подпольем наиболее реалистичными оказались расчетные методики НПО «Фундаментстройаркос» и АО «ТомскНИПИнефть» – РМ1-1 и РМ1-2, РМ2-1 и РМ2-2.

Литература

РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. – М.: Госстрой РСФСР, 1988. – 73 с.

СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. – М.: Стандартинформ, 2021. – 110 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОМЕТРИИ ГРУНТОВ

А.А. Шарков*, И.В. Прокопюк
ООО «РУСГЕОТЕХ», г. Москва, Россия
**sharkov@rgtek.ru*

Аннотация. Описаны технические решения для автоматизированного мониторинга температуры многолетнемерзлых грунтов. Рассмотрены сценарии построения систем температурного мониторинга с применением наземных и спутниковых технологий «Интернета вещей» для сбора и передачи данных. Приведен опыт внедрения систем температурного мониторинга на объекты Российской Арктики.

Ключевые слова: термометрия грунтов, система мониторинга, термокоса, логгер, спутниковая связь, радиоканал.

AUTOMATED SYSTEMS FOR SOIL THERMOMETRY

A.A. Sharkov*, I.V. Prokopyuk
RUSGEOTEKH LLC, Moscow, Russia
**sharkov@rgtek.ru*

Abstract. Technical solutions for automated monitoring of temperature in permafrost soils are described. Scenarios for building temperature monitoring systems using ground and satellite-based Internet of Things technologies for data collection and transmission are examined. Experience in implementing temperature monitoring systems in the Russian Arctic is provided.

Keywords: soil thermometry, monitoring system, thermistor string, data logger, satellite communication, radio channel.

Для обеспечения надежной, долговечной и безаварийной эксплуатации объектов промышленной и гражданской инфраструктуры Арктической зоны РФ требуются современные технологии и методы мониторинга состояния многолетней (вечной) мерзлоты.

В качестве одного из таких методов ООО «РУСГЕОТЕХ» предлагает автоматизацию термометрии грунтов путем развертывания на объекте системы мониторинга с беспроводной передачей данных по технологиям «Интернета вещей» (рис. 1).



Рисунок 1. Система температурного мониторинга грунтов ООО «РУСГЕОТЕХ».

Элементами системы мониторинга являются измерительные устройства (термокосы), регистрирующие приборы (логгеры), инфраструктура для создания распределенной сети удаленного сбора данных и программное обеспечение для накопления, хранения, анализа и визуализации полученных данных.

Возможности системы температурного мониторинга грунтов от ООО «РУСГЕОТЕХ»:

- автоматизированный мониторинг в режиме 24/7;
- развертывание в условиях действующего объекта;
- быстрый и простой монтаж по принципу plug-and-play;
- масштабируемость системы;
- распределенный доступ к информации для различных стейкхолдеров;
- межсистемная интеграция через API/SQL запросы.

Исходя из характеристик и местоположения объекта, возможно несколько сценариев построения систем температурного мониторинга:

1. Беспроводная передача данных по сотовой связи стандарта NB-IoT (рис. 2).



Рисунок 2. Беспроводная передача данных по технологии NB-IoT.

Особенности применения технологии:

- необходимо устойчивое покрытие сети NB-IoT (операторы МТС, Мегафон);
- для работы системы мониторинга не требуется источник питания;
- необходимо заключение договора с оператором сотовой связи;
- предусмотрена абонентская плата за услуги связи.

2. Беспроводная передача данных по радиоканалу NB-Fi/LoRaWAN (рис. 3).



Рисунок 3. Беспроводная передача данных по технологии NB-Fi/LoRaWAN.

Особенности применения технологии:

- на объекте создается дополнительная инфраструктура для сбора данных;
- для работы системы мониторинга требуется источник питания;
- необходима связь с сервером.

3. Сбор данных с устройств по радиоканалу NB-Fi и передача данных на удаленный сервер через геостационарные искусственные спутники Земли (рис. 4).



Рисунок 4. Беспроводная передача данных через геостационарные спутники.

Особенности применения технологии:

- на объекте создается дополнительная инфраструктура для сбора данных;
- для работы системы мониторинга требуется источник питания;
- необходимо заключение договора с оператором спутниковой связи;
- предусмотрена абонентская плата за услуги связи.

4. Передача данных на удаленный сервер через низкоорбитальные искусственные спутники Земли (рис. 5).



Рисунок 5. Беспроводная передача данных через низкоорбитальные спутники.

Особенности применения технологии:

- применяется на объектах в условиях отсутствия связи и электроснабжения;
- необходимо заключение договора с оператором спутниковой связи;
- предусмотрена абонентская плата за услуги связи.

МЕРЗЛОТНЫЕ УСЛОВИЯ УЧАСТКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОУЗЛА НА РЕКЕ МАТТА ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

А.А. Якимов*, В.Н. Ефремов, И.И. Христофоров, К.П. Данилов

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

**yakimovaa.mpi@yandex.ru*

Аннотация. По результатам комплексных электроразведочных исследований получена подробная характеристика геокриологических условий участка эксплуатации гидроузла. На основании данных электротомографии выполнено мерзлотное картирование территории и сделан вывод о недостаточной эффективности работы сезонных замораживающих устройств на берме верхового откоса грунтовой плотины. Применение радиоманнитотеллурического зондирования позволило оценить глубину залегания кровли многолетнемерзлых пород в пределах фильтрующей зоны, приуроченной к старому руслу р. Матта. Посредством георадиолокационной съемки получена информация о криогенном строении насыпных грунтов тела плотины и приповерхностной части массива коренных пород нижнего бьефа. Отмечена вероятность активизации процессов обходной фильтрации в левобережном примыкании гидроузла вследствие наличия признаков растепления коренных трещиноватых пород нижнего бьефа. Показано, что геофизические исследования являются важной составляющей превентивных мероприятий по обеспечению статической и фильтрационной устойчивости плотин низконапорных гидроузлов криолитозоны в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: грунтовая плотина, фильтрационный режим, мерзлотные условия, геофизический мониторинг, электроразведка.

PERMAFROST CONDITIONS OF THE HYDRAULIC STRUCTURE OPERATION SITE ON THE MATTA RIVER BASED ON ELECTRICAL SURVEY DATA

A.A. Yakimov^{*}, V.N. Efremov, I.I. Khristoforov, K.P. Danilov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

^{*}yakimovaa.mpi@yandex.ru

Abstract. According to the results of comprehensive electrical survey studies, a detailed information on the geocryological conditions of the hydraulic complex operation site was obtained. Based on the electrical resistivity tomography data, permafrost mapping of the territory was performed and the conclusion was made about the insufficient efficiency of seasonal cooling devices on the upper slope of the embankment dam. The use of radiomagnetotelluric sounding made it possible to estimate the depth to the permafrost table within the bounds of the localized seepage area at the site of the old riverbed of the Matta River. GPR studies provided a visual representation for cryogenic structure of the dam embankment soils and the upper part of the bedrocks massive in the downstream. The probability of bypass seepage processes activation in the left-bank abutment of the hydraulic structure due to the signs of thawing of the fractured bedrocks in the downstream is noted. It is shown that geophysical studies are an important component of preventive measures to ensure the static and filtration stability of the low-pressure hydraulic structures being operated in changing permafrost conditions.

Keywords: embankment dam, seepage regime, permafrost conditions, geophysical monitoring, electrical survey.

Рассматриваются результаты электроразведочных исследований на участке эксплуатации низконапорного гидроузла «Матта», обеспечивающего технической водой село Бердигестях Горного улуса Республики Саха (Якутия). Необходимость проведения исследований обусловлена происходящими сложными температурно-криогенными процессами в теле и основании грунтовой плотины гидроузла, потенциально влияющими на устойчивость сооружения и требующими всестороннего изучения и контроля.

Благодаря эффективному решению целевых задач геофизических исследований проведено мерзлотное картирование территории, выполнена пространственная локализация фильтрующей зоны плотины в районе старого русла р. Матта и дана оценка мощности талого интервала в массиве коренных пород основания сооружения.

В ходе анализа особенностей геоэлектрического строения территории наибольшее внимание уделялось участкам контрастно низких удельных электрических сопротивлений (УЭС менее 70 Ом·м). С ними связывается вероятность наличия искомым талых, обводненных и фильтрующих зон. Области высоких и умеренных значений УЭС, согласно априорной информации, представлены коренными многолетнемерзлыми породами – юрскими песчаниками и перекрывающими их до глубины 10–15 м суглинками. Экстремально высокие значения УЭС (более 600 Ом·м), фиксируемые на фланговых частях геофизических профилей, свидетельствуют о возможном распространении льдистых грунтов на склонах исследуемой долины.

Плановое оконтуривание низкоомных областей выполнено на основе данных электротомографии (ЭТ). В ходе интерпретации отмечен факт снижения эффективной глубины исследования для метода ЭТ в районах локализации талых пород с высокой степенью водонасыщения. В связи с этим оценка мощности выявленной таликовой зоны в районе старого русла р. Матта произведена по результатам радиоманнитотеллурического

зондирования (РМТ). Наиболее интенсивные процессы фильтрации происходят на глубинах 5–15 м от поверхности (рис. 1); глубина залегания кровли многолетнемерзлых пород на проблемном фильтрующем участке достигает 30 м.

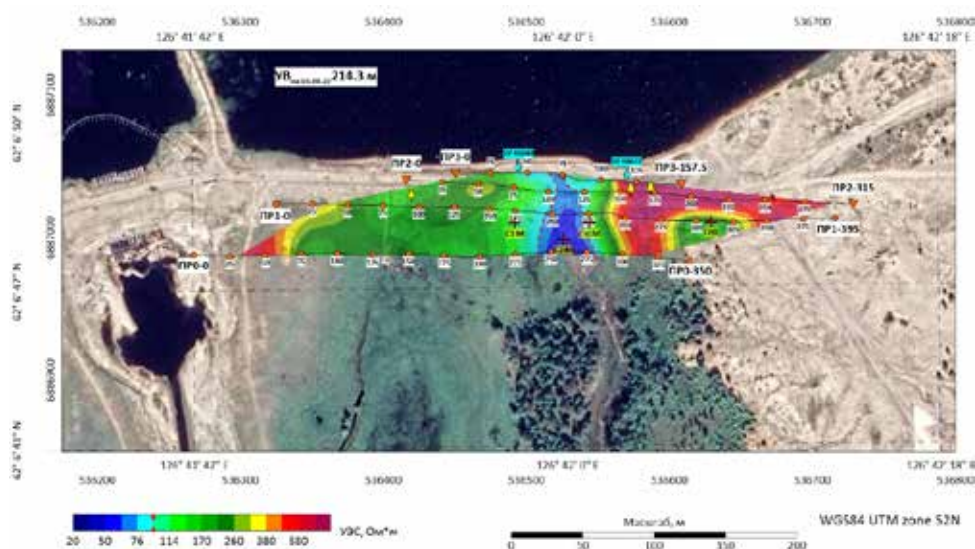


Рисунок 1. Оконтуривание основного участка фильтрации по геофизическим данным (распределение УЭС на глубине 15 м от поверхности).

В пределах выделяемой низкоомной фильтрующей области со стороны бермы верхового откоса находится действующая система замораживающих устройств. Согласно полученным геофизическим данным, в настоящее время эффективность мерзлотной завесы низкая. Способствовать стабилизации фильтрационного режима ГТС будет установка дополнительной замораживающей системы в основании плотины на участке старого русла со стороны нижнего бьефа.

Насыпные грунты центральной и левобережной частей плотины по геофизическим данным находятся преимущественно в талом состоянии. На локальном участке основания плотины со стороны нижнего бьефа водохранилища по результатам георадиолокации выявлены признаки переувлажнения приповерхностной части массива коренных пород, вероятно связанного с сезонными гидрогеологическими процессами в пределах деятельного слоя. Характерным признаком обводненных зон является повышенная амплитуда отраженного сигнала и многократные переотражения. В левобережном примыкании гидроузла выявлены признаки активизации процессов обходной фильтрации в результате ограниченного растепления массива коренных многолетнемерзлых пород нижнего бьефа, представленных льдистыми песчаниками с повышенной трещиноватостью. Вывод сделан в связи с наличием обширной низкоомной аномалии в диапазоне глубин 20–35 м от поверхности, выделяемой по результатам ЭТ и РМТ. По данным РМТ аномалия более интенсивная, значения УЭС в ее

центральной части не превышают 1 Ом•м. Разгрузка потенциального дополнительного фильтрационного потока может происходить как на поверхности, вызывая образование наледей, так и в смежные межмерзлотные горизонты.

Наиболее опасным вариантом развития процессов растепления пород основания гидроузла является возникновение сосредоточенной фильтрации, которая, наряду с интенсивной суффозией, может привести к деформациям плотины, частичным разрушениям и возникновению прорана (Чжан и др., 2019). Вероятной причиной изменения температурно-влажностного режима на участке эксплуатации рассматриваемого ГТС является продолжающееся потепление климата в Центральной Якутии. В данном регионе функционируют десятки низконапорных гидротехнических сооружений, состояние каждого из которых требует пристального внимания.

Мониторинговые геофизические исследования на отдельно выбранном объекте ГТС желательно проводить силами одной организации по запроектированной системе профилей и в определенный период времени (Великин, 2020). Помимо этого, необходимо выполнять регулярные натурные и инструментальные наблюдения за состоянием грунтовых плотин гидроузлов. В комплексе эти мероприятия обеспечат стабильное функционирование сооружений, предоставляя возможность эффективно контролировать развитие негативных геокриологических процессов и производить опережающий прогноз изменения состояния геокриологической среды.

Литература

Великин С.А. Комплексное геофизическое изучение инженерно-геокриологического состояния оснований гидро- и горнотехнических сооружений Якутской алмазонасной провинции: дис. ... д-ра техн. наук 25.00.08 / С. А. Великин. – Якутск, 2020. – 316 с.

Чжан Р.В., Великин С.А., Кузнецов Г.И., Крук Н.В. Грунтовые плотины в криолитозоне России. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2019. – 427 с.

СЕКЦИЯ 3

УСТОЙЧИВОСТЬ МЕРЗЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ. КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ. КРИОЛИТОЗОНА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

КРИОГЕННОЕ ПУЧЕНИЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ГРУНТОВ

А. Г. Алексеев^{1,2*}

1 – НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, АО «НИЦ Строительство»,
г. Москва, Россия

2 – НИУ МГСУ, г. Москва, Россия

*adr-alekseev@yandex.ru

Аннотация. Строительство сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, представленных органоминеральными грунтами, вызывает определенные трудности, связанные со сложнопрогнозируемым деформированием данных грунтов и фундаментов при промерзании. Морозное пучение данных грунтов не имеет должной для прогноза деформаций и напряжений исследовательской и нормативной базы. Статья содержит результаты лабораторных исследований морозного пучения органоминеральных грунтов. Лабораторными исследованиями выявлен механизм деформирования среднеразложившегося торфа и заторфованных песка и суглинка в зависимости от коэффициента водонасыщения и содержания органического вещества. Представлены результаты оценки деформации одиночной сваи от действия пучения.

Ключевые слова: криогенное (морозное) пучение грунтов, свая, торф, органоминеральный грунт.

CRYOGENIC HEAVING OF ORGANOMINERAL SOILS

Alekseev A. G.^{1,2*}

1 – NIIOSP named after N.M. Gersevanov JSC "SIC Construction",
Moscow, Russia

2 – NIU MGSU, Moscow, Russia

*adr-alekseev@yandex.ru

Abstract. The construction of structures in complex engineering and geological conditions, represented by organomineral soils, causes certain difficulties associated with the difficult-to-predict deformation of these soils and foundations during freezing. The frost heaving of these soils does not have a proper research and regulatory framework for the prediction of deformations and stresses. The article contains the results of laboratory studies of frost heaving of organomineral soils. Laboratory studies have revealed the mechanism of deformation of medium-decomposed peat and blocked sand and loam from the coefficient of water saturation and the content of organic matter. The results of the evaluation of the heave deformation of a single pile under the action of heave are presented.

Keywords: cryogenic (frosty) heaving of soils, piles, peat, organomineral soil.

Промерзающие органоминеральные и засоленные грунты деформируются по особому механизму в зависимости от количества органического вещества в грунте. Учитывая, что в данных грунтах применяют в основном свайные фундаменты, оценка деформации сваи за счет пучения является актуальной задачей.

Проведенные лабораторные исследования в условиях одностороннего вертикального промораживания грунта по одометрической схеме с возможностью внешнего массообмена позволили получить закономерности развития деформации пучения песка и суглинка в зависимости от содержания органического вещества в грунте (Алексеев, 2021, 2022).

Максимальная величина деформации пучения органоминерального грунта соответствует минимальному содержанию органического вещества как для песка пылеватого, так и суглинка в диапазоне 3–7 % (рис. 1). Добавки небольшого количества торфа значительно повышают влажность грунта за счет высокой гидрофильности торфа, что увеличивает криогенную миграцию.

Пучение пылеватого песка при $3\% < I_r < 64\%$ и суглинка при $7\% < I_r < 74\%$ практически отсутствует. Увеличение количества торфа в грунте приводит к увеличению влажности и уменьшению плотности грунта. При замерзании происходит перекомпоновка частиц грунта, включения торфа создают дополнительные пути миграции воды в промерзающий грунт, но также образуются пути реэмиграции, приводящие к оттоку воды и усадке грунта под действием давления пучения.

С увеличением органических включений до значений, превышающих 60 %, интенсивность криогенного пучения грунта возрастает: для песка пылеватого относительная деформация морозного пучения ε_f составляет 0,02 д.е., для суглинка – 0,06 д.е.; также увеличивается количество миграционных путей и возрастает суммарная влажность грунта. Избыточная влажность приводит к тому, что вода не успевает реэмигрировать под действием давления пучения.

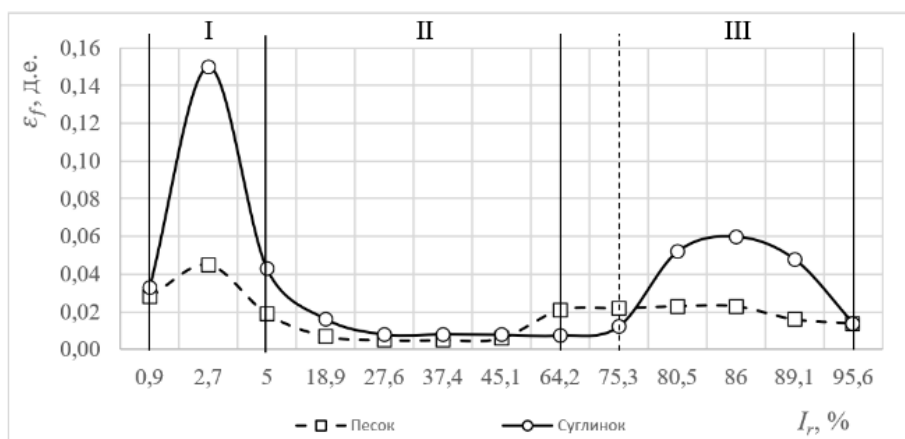


Рисунок 1. Зависимость относительной деформации морозного пучения (ε_f) от содержания органического вещества в грунтах (I_r).

Нормы (СП 24.13330, 2021) позволяют использовать аппарат теории упругости для расчета осадок свай. Применим аналогичный подход при оценке выхода сваи от пучения. Сваю считаем несжимаемой, находящейся в линейно-деформированной среде, перемещение сваи происходит при телескопическом сдвиге окружающей сваю грунта.

Предполагаем, что грунт между линиями А и В (рис. 2) деформируется за счет напряжений от ствола сваи, вызванных давлением пучения грунта, промерзающего между

линиями В и С. При этом пренебрегаем работой пяты сваи из-за ее отсутствия при выходе сваи (отрыве пяты от грунта).

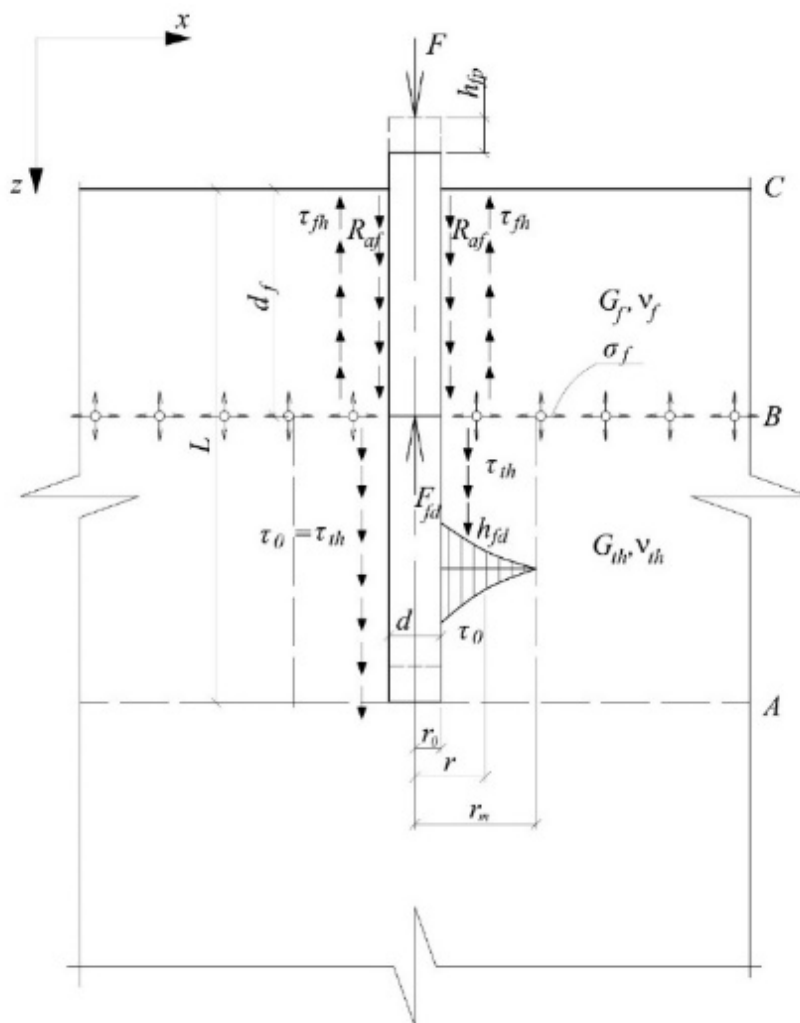


Рисунок 2. Схема к расчету выхода сваи под действием криогенного пучения.

F_{fd} – усилие пучения, действующее на сваю; τ_{fh} – касательные силы морозного пучения; R_{af} – силы смерзания сваи и грунта; τ_{th} – силы сцепления грунта и сваи; F – внешняя нагрузка; d_f – глубина промерзания; h_f – деформация пучения грунта; h_{fp} – деформация пучения сваи; L – длина сваи; r_0, r_m, r – радиус сваи, предельный радиус воздействия сваи, радиус воздействия сваи.

Выражение для определения выхода сваи h_{df} при $r = r_0$ за счет деформирования грунта в околосвайной зоне (r_m) под действием пучения будет иметь следующий вид:

$$h_{df} = \frac{(F_{df} - F)}{2\pi G_{th}(l - d_f)} \ln \left(\frac{K_n(L - d_f)}{r_0} \right) \quad (1)$$

Предложенное решение позволяет определить величину выхода сваи при действии пучения в зоне линейного деформирования грунта.

При достижении предельных касательных напряжений основания, состоящего из органоминеральных грунтов и торфов (при $S_r \geq 0,85$), в качестве нормального давления

принимается эффективное напряжение $\sigma_t - u$, где σ_t и u – значения полного нормального напряжения и порового давления соответственно.

Литература

Алексеев, А. Г. Криогенное пучение торфов и заторфованных грунтов / А. Г. Алексеев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2021. – № 6 – С. 27–31.

Алексеев, А. Г. Взаимодействие фундаментов с пучинистыми структурно-неустойчивыми грунтами / А. Г. Алексеев // Фундаменты. – 2022. – № 1 (7) – С. 16-17.

СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. – Москва : Минстрой России, 2021. – 82 с.

О ФЕНОМЕНЕ «ОСЕННЕЙ ЗАСУХИ» И КОНТИНЕНТАЛЬНОСТИ ПОЧВЕННОГО КЛИМАТА НА ЮЖНОЙ ГРАНИЦЕ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАБАЙКАЛЬЯ

Н.Б. Бадмаев^{1, 2 *}, А.И. Куликов¹

1 – Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

2 – Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова, г. Улан-Удэ, Россия

** nima_b@mail.ru*

Аннотация. В Забайкалье в основе аридизации климата лежит увеличение суммы активных температур и последующее увеличение испаряемости. По построенным климадиagramмам определена длительность засушливого периода в криоаридных ландшафтах. Выявлен феномен «осенней засухи», которые в настоящее время стали регулярными. Широко распространенная многолетняя криолитозона на потепление реагирует сокращением ареала, повышением температуры и увеличением мощности протаивания почв на 70–140 см за последнее столетие. Анализ температурного поля почв показывает усиление континентальности почвенного климата. Установлено, что в степных почвах частота фазовых переходов максимальна в криоаридных почвах, чем в каштановых, в первых почвах – в два раза чаще и глубже (до 40 см) наблюдаются процессы промерзания и протаивания в суточном цикле.

Ключевые слова: глобальные изменения, климат, континентальность, мерзлота, почва, засуха.

ON THE PHENOMENON OF "AUTUMN DROUGHT" AND THE CONTINENTALITY OF SOIL CLIMATE ON THE SOUTHERN BORDER OF THE TRANSBAIKAL CRYOLITHOZONE

N.B. Badmaev^{1, 2 *}, A.I. Kulikov¹

1 – Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russia

2 – Buryat State Agricultural Academy. V.R. Filippova, Ulan-Ude, Russia

** nima_b@mail.ru*

Abstract. In Transbaikalia, climate aridization is based on an increase in the sum of active temperatures and a subsequent increase in evaporation. Based on the constructed climadiagrams, the duration of the dry period in cryoarid landscapes was determined. The phenomenon of "autumn drought" has been revealed, which has now become regular. The widespread perennial permafrost zone responds to warming by reducing its area, increasing temperature, and increasing the thickness of soil thawing by 70–140 cm over the past century. An analysis of the temperature field of soils shows an increase in the continentality of the soil climate. It has been established that in steppe soils the frequency of phase transitions is maximum in cryoarid soils than in chestnut soils; in the first soils, the processes of freezing and thawing in the daily cycle are observed twice as often and deeper (up to 40 cm).

Keywords: global changes, climate, continentality, permafrost, soil, drought.

На 65 % территории России формируются почвы в условиях отрицательных температур, высокой континентальности и годовых теплооборотов. По территории юга Витимского плоскогорья и севера Селенгинского среднегорья Забайкалья проходит южная граница криолитозоны. Именно здесь, в переходной зоне от сплошной криолитозоны к

островной, наиболее ярко проявляется динамика температурного поля почв (ТПП), вызванная глобальными и региональными изменениями климата.

Форсированное потепление климата Забайкалья выражается в высоких значениях регрессионных коэффициентов линейных трендов средней годовой температуры воздуха. Для количественного измерения использован простой и объективный показатель – среднее квадратическое отклонение (СКО). При неизменной годовой сумме атмосферных осадков в настоящее время по сравнению с 30-ми годами среднее квадратическое отклонение увеличилось в 2–2,5 раза.

Колебания суммы атмосферных осадков по годам весьма значительны, разница между отдельными годами достигает порядка 100–150 мм. В Улан-Удэ при экстремумах 413,3 мм (1959 г.) и 109,6 мм (1989 г.) средняя амплитуда составляет 303,7 мм. Изменчивость количества осадков возрастает во времени, т.е. экстремальность условий по этому показателю возрастает. Так, если на отрезке 1935–1942 гг. СКО количества годовых осадков равнялось $\pm 32,2$ мм, то в настоящее время отклонения от климатической нормы стали более резкими и СКО составляет ± 65 –83 мм, т.е. отклонения от средней многолетней суммы (256 мм) возросли от 13 до 25–32 % (рис. 1).

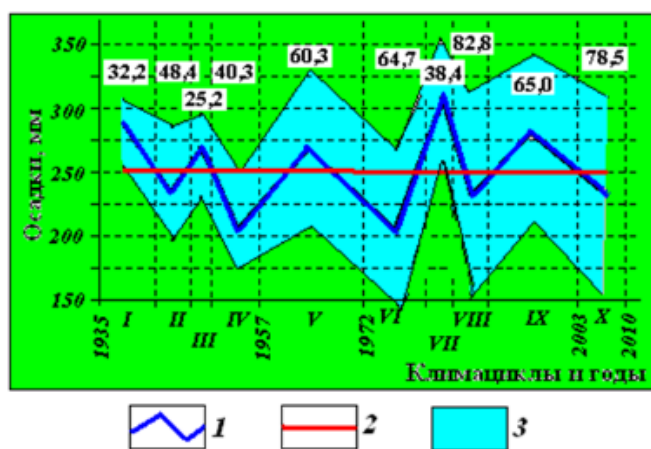


Рисунок 1. Динамика сумм атмосферных осадков по климациклам и возрастание неустойчивости атмосферного увлажнения во времени. 1 – среднее многолетнее сумм осадков по климациклам, 2 – среднее многолетнее значение осадков за весь период, 3 – диапазон изменения среднеквадратического отклонения (СКО) и значения СКО (цифрами) по климациклам.

Колебания суммы атмосферных осадков по годам весьма значительны, разница между отдельными годами достигает порядка 100–150 мм. В Улан-Удэ при экстремумах 413,3 мм (1959 г.) и 109,6 мм (1989 г.) средняя амплитуда составляет 303,7 мм. Изменчивость количества осадков возрастает во времени, т.е. экстремальность условий по этому показателю возрастает. Так, если на отрезке 1935–1942 гг. СКО количества годовых осадков равнялось $\pm 32,2$ мм, то в настоящее время отклонения от климатической нормы стали более

резкими и СКО составляет $\pm 65\text{--}83$ мм, т.е. отклонения от средней многолетней суммы (256 мм) возросли от 13 до 25–32 %.

В основе аридизации климата лежит увеличение суммы активных температур и последующее увеличение испаряемости. По построенным климадиagramмам определена длительность засушливого периода в криоаридных ландшафтах. Выявлен феномен «осенней засухи», которые в настоящее время стали регулярными. Для количественной оценки аридизации земель построены климадиagramмы по Вальтеру-Госсену (рис. 2).

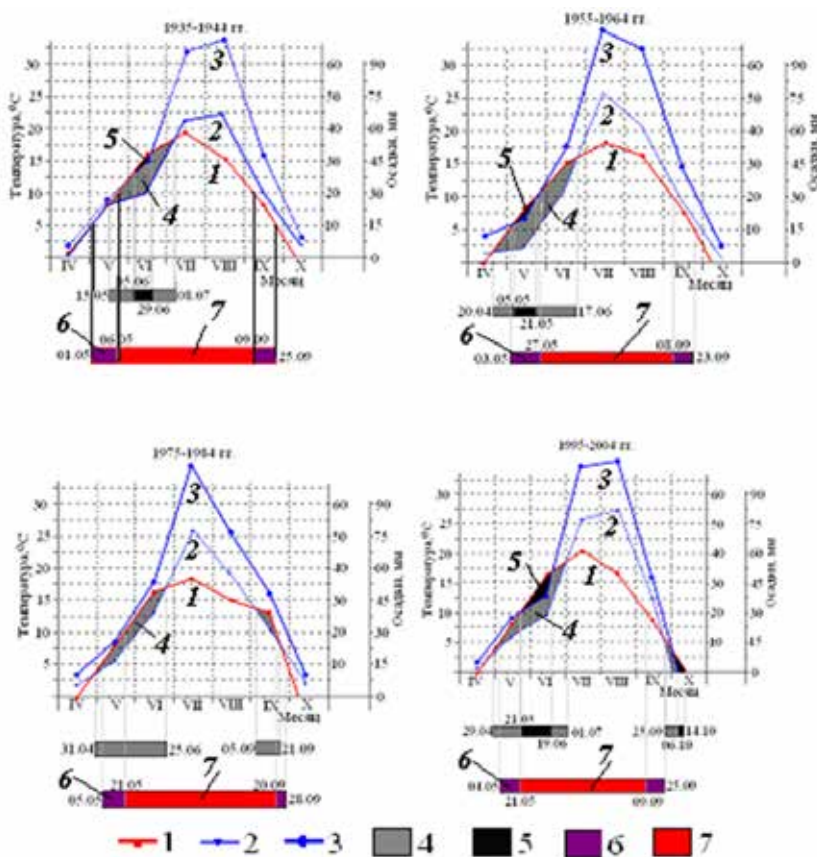


Рисунок 2. Климатадиagramмы (по Вальтеру-Госсену) ст. Хоринск : 1 – среднемесячная температура воздуха, 2 – осадки при соотношении 20 мм = 10 °С, 3 – то же при 30 мм = 10 °С, 4 – умеренно засушливый период, 5 – остро засушливый период, 6 – период с температурой выше 5 °С, 7 – то же выше 10 °С.

Аридизация степи усиливается, особенно за последние десятилетия возрастает интенсивность засух. Важно, что климатадиagramмы последних лет регистрируют осенние засухи, чего ранее не было.

Видимо, по этой причине участились осенние пожары в забайкальских лесах. В настоящее время только весной засуха наблюдается в течение 29 дней, а в совокупности с осенней – 37 дней при засушливом периоде, равном 65 дням. Из климатадиagramм вытекает,

что число дней с активной температурой возросло не менее, чем на 20 дней, по сравнению с 30–60-ми годами.

Широко распространенная многолетняя мерзлота на потепление реагирует сокращением ареала, повышением температуры и увеличением мощности протаивания почв на 70–140 см за последнее столетие. Анализ ТПП показывает усиление континентальности почвенного климата. Установлено, что в степных почвах частота фазовых переходов максимальна в криоаридных почвах, чем в каштановых, в первых почвах – в два раза чаще и глубже (до 40 см) наблюдаются процессы промерзания и протаивания в суточном цикле. Среди фаций ландшафта наиболее ярко эти процессы отмечены в приводораздельных и транзитных позициях склона южной экспозиции, где частота суточных фазовых переходов почвенной влаги может достигать до 33–35 случаев в весенний период в поверхностных слоях почв (до 5–7 см).

Исследования проведены при финансовой поддержке государственного задания № 121030100228-4.

УСТОЙЧИВОСТЬ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ К ПОТЕПЛЕНИЮ КЛИМАТА

С.П. Варламов^{*}, Ю.Б. Скачков, П.Н. Скрябин

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

** svarlamov@mpi.ysn.ru*

Аннотация. Представлены результаты 40-летнего геокриологического мониторинга нетронутых природных мерзлотных ландшафтов. Количественно оценена устойчивость теплового состояния верхних горизонтов криолитозоны в условиях потепления климата.

Ключевые слова: потепление климата, мерзлотные ландшафты, деятельный слой, температура грунтов, тренд, устойчивость.

STABILITY OF PERMAFROST LANDSCAPES IN CENTRAL YAKUTIA TO CLIMATE WARMING

S.P. Varlamov^{*}, Yu.B. Skachkov, P.N. Skryabin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

** svarlamov@mpi.ysn.ru*

Abstract. The results of 40 years of geocryological monitoring of untouched natural permafrost landscapes are presented. The stability of the thermal state of the upper horizons of the permafrost zone under the conditions of climate warming has been quantitatively assessed.

Keywords: climate warming, permafrost landscapes, active layer, ground temperature, trend, stability.

Изучение термической устойчивости мерзлотных ландшафтов естественных, нетронутых деятельностью человека, в условиях современного потепления климата является весьма актуальной задачей. При оценке эволюции криолитозоны в основном характеризуют количественную взаимосвязь между приращениями температуры воздуха и температуры

грунтов в слое годовых теплооборотов. Представляет интерес сравнение современных трендов изменения температуры воздуха и температуры грунтов на глубине 10 м.

Для определения устойчивости мерзлых толщ и их чувствительности к изменениям климата нами принят безразмерный коэффициент $K_\alpha = \alpha T_0 / \alpha T_{вг}$, предложенный *А.В. Павловым (2008)*. При значениях $K_\alpha \leq 0,50$ отмечается высокая термическая устойчивость мерзлых грунтов, при $0,5 < K_\alpha \leq 0,75$ – средняя устойчивость и при $K_\alpha > 0,75$ – слабая устойчивость мерзлых грунтов.

По итогам многолетних наблюдений за тепловым состоянием грунтов естественных ландшафтов в различных типах местности определены тренды среднегодовой ($\alpha T_{вг}$) и среднелетней температуры воздуха ($\alpha T_{вл}$), тренды мощности сезонно-талого слоя ($\alpha \xi$) и температуры грунтов на глубине 10 м (αT_0).

На основе анализа связи между трендами αT_0 и $\alpha T_{вг}$ выявлена значимая зависимость в увлажненных более теплопроводных отложениях мелкодолинного и межгрядово-низинного типов местности и более слабая – в межлассном типе местности. В песчано-грядовом типе местности наблюдается обратная связь, обусловленная преобладанием иссушенных, слаботеплопроводных песчаных грунтов. В плакорном, аласном и низкотеррасовом типах местности в настоящее время сложно установить четкие зависимости между трендами αT_0 и $\alpha T_{вг}$. В ландшафтных комплексах мелкодолинного, низкотеррасового и пойменного типов местностей при современном потеплении отмечается тенденция к охлаждению грунтов, что видимо, вызвано затеняющей ролью интенсивно произрастающей растительности.

Не выявлено четкой эмпирической зависимости между трендами $\alpha \xi$ и $\alpha T_{вл}$ в песчано-грядовом и отчасти в межлассном типах местности. Слабая зависимость проявляется в некоторых урочищах межлассного и межгрядово-низинного типов местности. Значимая зависимость отмечается в осоково-сфагновом ернике тылового шва надпойменной террасы мелкодолинного типа местности из-за интенсивного произрастания густых зарослей ерников.

В Центральной Якутии K_α в плакорном типе местности изменяется от 0,15 до 0,55, в межлассном колеблется в пределах 0,11–0,53, песчано-грядовом – 0,07–0,08, межгрядово-низинном 0,14–0,22, мелкодолинном – 0,31–0,32. В ландшафтных комплексах аласного, пойменного, низкотеррасового и отчасти в некоторых природных комплексах песчано-грядового, мелкодолинного типов местностей встречается охлаждение грунтов, значение K_α отрицательные. В целом литогенная основа природных комплексов региона в условиях современного потепления климата относится преимущественно к высокой термической устойчивости мерзлых грунтов. На локальных участках плакорного и межлассного типов местности грунты относятся к средней устойчивости.

По реакции на климатические колебания (потепление) типы местности можно подразделить на 3 категории – высоко-, средне- и слабочувствительные, составляющие следующий ландшафтный ряд: мелкодолинный, пойменный – межгаласный, песчано-грядовый, межгрядово-низинный – плакорный, склоновый, аласный, низкотеррасовый. Межгодовые изменения температуры грунтов на подошве слоя годовых теплооборотов по категориям варьируют соответственно в пределах: 0,9–4,1; 0,4–1,8; 0,3–0,9 °С. Межгодовая изменчивость мощности деятельного слоя от ее многолетних средних значений по категориям составляет соответственно: 34–172, 14–75 и 4–47 %.

На фоне наибольшего потепления современного климата в Центральной Якутии по сравнению с другими северными регионами России, изменение термического состояния слоя годовых теплооборотов в естественных лесных ландшафтах выражено слабо. Современный период характеризуется в целом достаточной термической устойчивостью как высокотемпературных, так и низкотемпературных многолетнемерзлых пород (рис. 1). Основными регулирующими факторами динамики теплового состояния грунтов мерзлотных ландшафтов является режим снегонакопления и увеличение биомассы. На открытых луговых ландшафтах тенденция повышения среднегодовой температуры грунтов в 2 раза больше, чем в лесных комплексах. Глубина теплового проникновения современного потепления климата на луговых участках составила 40–50 м. Температура грунтов глубже 60 м находится в стационарном состоянии. Короткопериодные колебания температуры грунтов последних лет обусловлены в основном влиянием аномально многоснежных и аномально малоснежных зим.

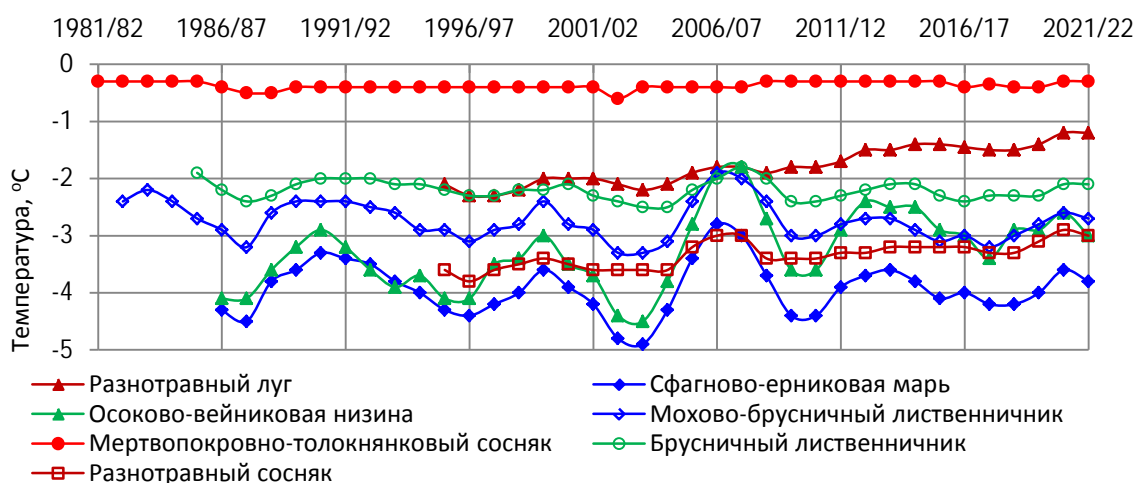


Рисунок 1. Многолетняя изменчивость температуры грунтов слоя годовых теплооборотов на глубине 10 м на стационаре «Чабыда» (Варламов и др., 2022).

Глубина сезонного протаивания грунтов в естественных ландшафтах является достаточно стабильной и характеризуется малой межгодовой изменчивостью, слабо реагирует на потепление климата и имеет разнонаправленные тенденции. Тренд возрастания глубины сезонного протаивания статистически незначимый.

Литогенная основа мерзлотных ландшафтов региона в условиях современного потепления климата относится преимущественно к категории высокой термической устойчивости. Урочища плакорного и межгаласского типов местности относятся к категориям высокой и средней термической устойчивости.

Многолетние режимные наблюдения за тепловым состоянием грунтов проведены в рамках приоритетных направлений и программ фундаментальных исследований СО РАН. Работа подготовлена при поддержке Проекта № 4 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» (0303-2021-0004). Регистрационный номер АААА-А20-120111690010-2.

Литература

Варламов С.П., Ю. Б. Скачков. «Чабыда» (Центральная Якутия) // Мониторинг в криолитозоне : сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов (Москва, 14–17 июня 2022 г.) / Под редакцией Р.Г. Мотенко. – М., 2022. – С. 214–221.
Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. – 229 с.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛАНДШАФТОВ ВОДОСБОРНОГО БАССЕЙНА РЕКИ АНМАНГЫНДА

А.И. Васильев*

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

** vasilalex@mpi.ysn.ru*

Аннотация. Проведен анализ современного состояния ландшафтных комплексов на водосборном бассейне реки Анмангында. Район исследования находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород и представлен горно-редколесными ландшафтами среднегорных сооружений Северо-Восточной Сибири с общей площадью 376 км². Маршрутными исследованиями выявлены основные типы местности, растительные ассоциации и криогенные рельефообразующие процессы. Обработан полевой материал, на основе которого составлена ландшафтная карта водосборного бассейна масштаба 1:10 000 по программе ArcGIS.

Ключевые слова: наледь, тип местности, растительные ассоциации, криогенные процессы, ландшафтная карта.

CURRENT STATE OF THE LANDSCAPES IN THE CATCHMENT AREA OF THE ANMANGYND A RIVER

A.I. Vasiliev*

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

** vasilalex@mpi.ysn.ru*

Abstract. An analysis of the current state of landscape complexes in the catchment area of the Anmangynda river was carried out. The study area is located in the zone of continuous distribution of permafrost and is represented by mountain-sparsely forested landscapes of mid-mountain structures of North-Eastern Siberia with a total area of 376 km². Route studies revealed the main types of terrain, plant associations and cryogenic relief-forming processes. Field

material was processed and on the basis of which a landscape map of the drainage basin was compiled at a scale of 1:10 000 using the ArcGIS program.

Keywords: frost, terrain type, plant associations, cryogenic processes, landscape map.

В последние десятилетия в связи с потеплением климата, в условиях Крайнего Севера наблюдается тенденция изменения водного баланса криолитозоны и уменьшения площадей наледей, где типичным представителем из множества наледей Колымского региона является Анмангындинская наледь, которая расположена в бассейне одноименной реки, правом притоке р. Детрин. Длина этой наледи в период максимального развития достигает около 7 км со средней мощностью около 1,8 м (Алексеев, 2016). Район ландшафтных исследований водосборного бассейна р. Анмангында с общей площадью около 376 км² расположен в Магаданской области в пределах горно-редколесных ландшафтов высотой от 900 до 1500 м сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность ММП по литературным данным на водораздельных массивах здесь достигает 300–400 м, в днищах долин рек колеблется в пределах 80–150 м. Температура ММП в конце прошлого века в слое нулевых годовых колебаний составляет от –1,7 до –3,5 °С. Средняя многолетняя температура воздуха составляет около –11 °С, среднее годовое количество осадков – 300 мм.

При составлении ландшафтной карты за основу классификационных построений взята разработанная в Институте мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН методика картографирования мерзлотных ландшафтов (Федоров, 1991), где в качестве критериев были использованы мезорельеф и группы растительных ассоциаций. Появление ГИС-технологий несколько упростило процесс классификации ландшафтов посредством послойного наложения типов местности (геолого-геоморфологических единиц) и растительных ассоциаций (биогидроклиматических единиц).

Ландшафтная карта масштаба 1:10 000 составлена на базе программы ArcGis 10.1. В разработке содержания карты использованы космические снимки и маршрутные данные автора. Были использованы материалы дешифрирования ландшафтных фаций и ландшафтного описания во время полевых работ. На территории водосборного бассейна выделено и отображено на ландшафтной карте 5 типов местности и 20 растительных ассоциаций. Составленная ландшафтная карта масштаба 1:10 000 (рис. 1) дает полную информацию по ландшафтным условиям территории водосборного бассейна р. Анмангында, и расшифровка номеров легенды (комплексов) дается в табл. 1.

Таким образом, наибольшее распространение из 21 ландшафтов получили следующие естественные природно-территориальные комплексы: тундры горные лишайниковые и кустарничковые каменистые с редкими кедровыми стланиками (комплекс 1-2 – 35,9 % от общей площади), лиственничные редины с кедровыми стланиками и ерниками багульниково-рододендроново-осоковые сфагново-лишайниковые (комплекс 3–13 – 12,3 %

от общей площади), налесь (комплекс 5–20 – 7,7 % от общей площади) и гари на лиственничных редколесьях и кедровом стланике мертвопокровные (комплекс 3–14 – 7,28 % от общей площади).

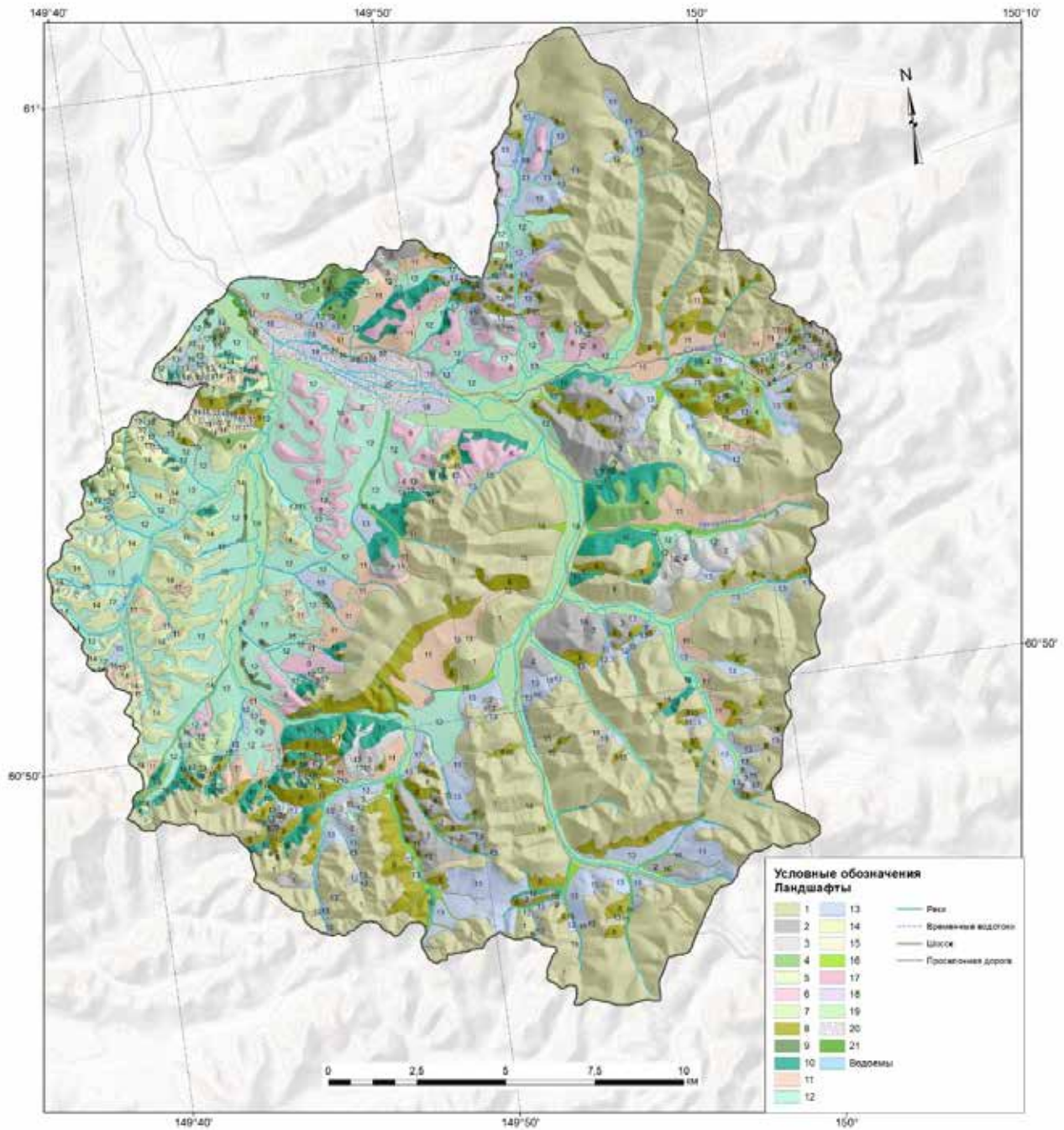


Рисунок 1. Ландшафтная карта водосборного бассейна реки Анмангында масштаба 1:10 000.

Типы местности, растительные ассоциации и криогенные процессы водосборного бассейна реки Анмангында

Тип местности	Растительные ассоциации	Криогенные процессы и СТС, м
1. Горно-привершинный	1. Пустыни горные эпилитно-лишайниковые каменистые, с единичными кедровыми стланиками. 2. Тундры горные лишайниковые и кустарничковые каменистые, с редкими кедровыми стланиками. 3. Заросли кедрового стланика кассиопейно-лишайниковые и мертвопокровные	Криогенное выветривание, снежники
2. Плоскогорно-привершинный	4. Тундры горные каменистые кассиопейно-лишайниковые, с редкими кедровыми стланиками и угнетенными лиственницами. 5. Тундры горные каменистые с зарослями кедрового стланика и ольховника, рододендрово-багульниковые. 6. Лиственничные редколесья в сочетании с тундрами горными с кедровыми стланиками шикшево-багульниковые лишайниковые. 7. Заросли кедрового стланика кассиопейно-лишайниковые, с каменными осыпями	Криогенное выветривание, выпучивание глыб и щебня (пятна-медальоны), каменные потоки
3. Горно-склоновый	8. Заросли кедрового стланика с единичными лиственницами, бруснично-багульниковые лишайниковые. 9. Заросли кедрового стланика бруснично-багульниковые сфагновые. 10. Лиственничные редколесья с кедровыми стланиками и ольховниками бруснично-багульниковые сфагново-лишайниковые. 11. Лиственничные редколесья с кедровыми стланиками лишайниковые в сочетании со сфагновой марью, морошково-багульниково-осоковые пушицевые. 12. Лиственничные редины на лишайниково-сфагновой мари с ерниками, морошково-багульниково-осоковые. 13. Лиственничные редины с кедровыми стланиками и ерниками багульниково-рододендрово-осоковые сфагново-лишайниковые. 14. Гари на лиственничных редколесьях и кедровом стланике, мертвопокровные	Курумы, солифлюкция, термоэрозия, заболачивание, морозобойное растрескивание. СТС - 0,3-0,6 м
4. Горно-долинный (днища горных речек)	15. Лиственничные редколесья зеленомошно-сфагновые в сочетании с ивняками и ольховниками, осоковые. 16. Лиственничные леса с ерниками и ивняками багульниково-грушанково-осоковые, лишайниково-зеленомошные	Морозобойное растрескивание, заболачивание. СТС - 0,4-0,65 м
5. Горно-долинный террасовый	17. Лиственничные редины и редколесья ерниковые кустарниково-зеленомошные в сочетании с участками чозениевых и тополевых лесов, ерников и сфагновой мари. 18. Разнотравно-кустарничковые ерниковые наледные поляны с единичными лиственницами и чозениями. 19. Пойма рек и ее притоков в сочетании с лиственничными редколесьями с участками чозениевых и тополевых лесов, ивняками и лугами. 20. Наледь. 21. Каменистые русла рек с участками чозениевых и тополевых лесов с ивняками разнотравными	Наледеобразование, заболачивание, морозобойное растрескивание, морозное пучение

Ландшафтные исследования проведены при поддержке проекта Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата». Руководитель проекта СПбГУ – к.т.н. О. М. Макарьева.

Литература

Алексеев В. Р. Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // Лед и Снег. – 2016. – 56 (1). – С. 73–92. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-73-92>

Федоров А. Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. – Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН СССР, 1991. – 140 с.

СОСТОЯНИЕ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ ПО ДАННЫМ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ЛЕНО-АМГИНСКОМ МЕЖДУРЕЧЬЕ

П.В. Ефремов*, Н.И. Башарин

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

** pvefremov@mpi.ysn.ru*

Аннотация. В Лено-Амгинском междуречье имеется множество участков заброшенных пашен. По данным геокриологического мониторинга, потепление климата в регионе с конца 80-х годов прошлого века повлияло на активное развитие криогенных процессов и явлений на пашнях. В основном из-за активизации термокарстовых образований, в последующие годы большие площади пашен были брошены. В данное время в регионе поверхность 33 % заброшенных земель нарушена многочисленными былларами и зачаточными термокарстовыми озерами. 57 % поверхности земель не нарушена, а 10 % зарастает древесной и кустарниковой растительностью. При дальнейшем потеплении климата, часть заброшенных земель с ненарушенной поверхностью может превратиться в нарушенные из-за активизации термокарста.

Ключевые слова: потепление климата, криогенные процессы, повторно-жильные льды, сезонно-талый слой, термопросадки.

THE CONDITION OF CROPLANDS IN THE LENA–AMGA WATERSHED FROM GEOCRYOLOGICAL MONITORING DATA

P.V. Efremov*, N.I. Basharin

1 – Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

** pvefremov@mpi.ysn.ru*

Abstract. There are numerous abandoned cropland fields in the Lena–Amga watershed. Geocryological monitoring data indicate that climatic warming observed in the region since the late 1980s triggered rapid thermokarst and other thaw-related processes in croplands. Many fields were abandoned in the following decades primarily due to thermokarst activity. Presently, 33 % of the abandoned fields is disrupted by numerous thaw depressions and incipient thaw lakes, 57 % is undisturbed, and 10 % is being overgrown by trees and shrubs. Further warming will lead to surface deterioration in the areas currently not affected by thermokarst development.

Keywords: climate warming, permafrost processes, wedge ice, active layer, thaw settlement.

В данное время в Лено-Амгинском междуречье имеется множество участков заброшенных пашен. Состояние поверхности этих земель различное. Из-за развития термокарста в условиях потепления климата некоторые из них имеют западинно-бугристую поверхность. У некоторых поверхность ровная, а некоторые зарастают древесной и кустарниковой растительностью. Основная цель работы – оценить состояние этих заброшенных пахотных земель.

Основным мониторинговым полигоном в Лено-Амгинском междуречье является заброшенная пашня Дыргыабай, которая была образована на межаласье путем вырубki леса, раскорчевки и распашки в 50-х годах прошлого века. Мониторинговые площадки подробно описаны в совместной монографии с проф. П.П. Гаврильевым и к.г.н. И.С. Угаровым (*Гаврильев и др., 2001*). Пашня использовалась по назначению до 1996 г. и была заброшена из-за развития многочисленных криогенных процессов и явлений. Грунты полигона являются сильнольдистыми – до 0,6. В 1992 г. повторно-жильные льды (ПЖЛ) залежали в основном на глубине 1,80 м. В данное время глубина залегания ПЖЛ изменяется от 2,4 до 4,5 м, в зависимости от состояния поверхности залежи. На поверхности образовались многочисленные площадные термокарстовые образования – быллары. Их размеры в поперечнике изменяются от 8 до 60 м (рис. 1). Местами образовались зачаточные термокарстовые озера. Помимо них имеются многочисленные термопросадки небольшого размера, что является следствием продолжения таяния ПЖЛ и дальнейшего развития криогенных процессов и явлений.

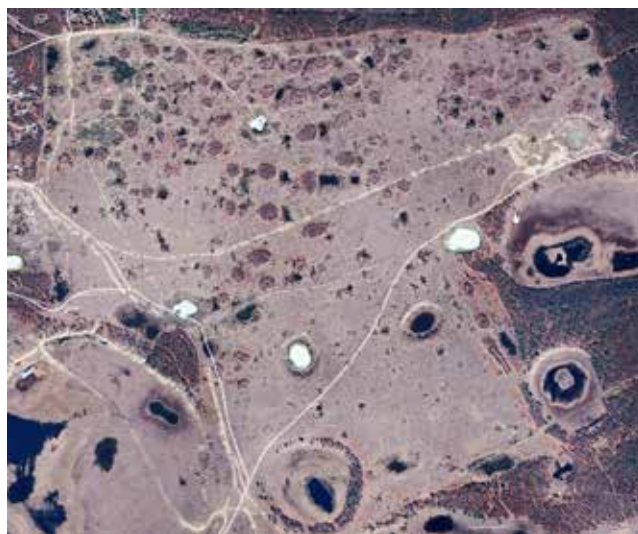


Рисунок 1. Состояние поверхности полигона Дыргыабай (май 2022 г.).

Основной причиной развития криогенных процессов и явлений на полигоне стало потепление климата в регионе с конца 1980-х годов прошлого века. По данным метеостанций Якутск, Амга, Ытык-Кюель, потепление в регионе усилилось с 1989 г. и продолжается до сих пор. Максимальное значение среднегодовой температуры по данным метеостанций Якутск и Амга было в 2019-2020 гг. и составило $-6,2$ и $-7,6$ °С соответственно. А по данным метеостанции Ытык-Кюель максимальное значение было в 2007-2008 гг. – $-8,3$ °С.

Второй причиной можно назвать распад крупных совхозов на мелкие хозяйства после развала СССР. Мелкие хозяйства уже не могли следить за состоянием пахотных земель, и многочисленные пашни выводились из севооборота, превращаясь в бросовые земли.

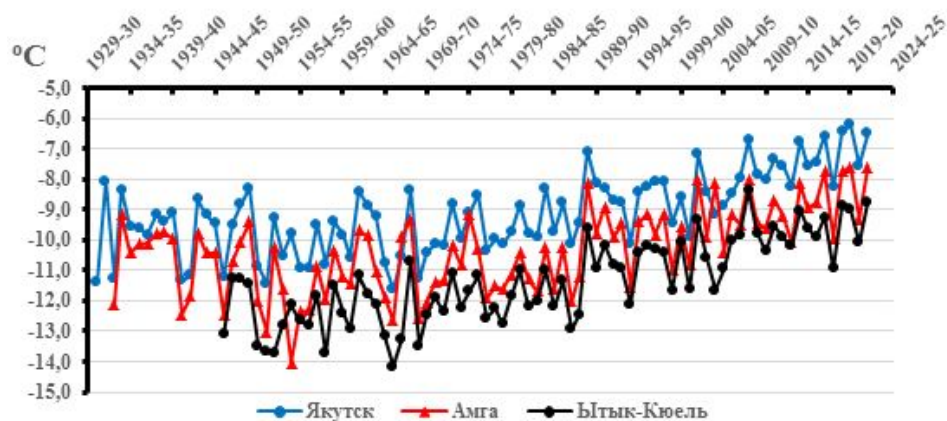


Рисунок 2. Динамика среднегодовой температуры воздуха гидрологического года по данным метеостанций, 1930–2022 гг.

Еще в начале 1990-х годов профессор П.П. Гаврильев в своей работе писал, что почвогрунты верхней части ледового комплекса региона потеряли часть холода и превратились из устойчивых в неустойчивые к потеплению климата (Гаврильев, 1993).

Когда проводятся весенние и осенние распашки, небольшие просадки исчезают. После превращения пашен в бросовые земли, развитие криогенных процессов и явлений усиливается и на поверхности появляются многочисленные термопросадки, которые со временем превращаются в быллары. В некоторых из них даже образуются зачаточные термокарстовые озера.

Нами сделана оценка заброшенных земель региона по трем категориям: не нарушенные термокарстом земли; нарушенные термокарстом; не нарушенные, но зарастающие древесной и кустарниковой растительностью (табл. 1).

Таблица 1

**Состояние заброшенных пашен на ледовом комплексе
Лено-Амгинского междуречья по районам**

Районы	Не нарушенные		С былларами и зачаточными термокарстовыми озерами		Заросшие древесной растительностью	
	м ²	%	м ²	%	м ²	%
Амгинский	109598087,5	59,5	61450825,3	33,6	11804485,2	6,5
Мегино-Кангаласский	57268872,6	67,3	13196201,4	15,5	14638643,4	17,2
Таттинский	18503675,9	32,3	35214817,2	61,5	3566983,0	6,2
Усть-Алданский	36917670,9	74,2	3704815,9	7,4	9145024,37	18,4
Чурапчинский	47229236,0	48,1	41759601,4	42,5	9197331,87	9,4
Итого:	269517542,9	57,0	155326261,2	32,8	48352467,9	10,2

При дальнейшем потеплении климата часть заброшенных земель с ненарушенной поверхностью может с большой вероятностью превратиться в нарушенные из-за активизации термокарста.

Литература

Гаврильев П.П. О развитии криогенных процессов и устойчивости агроземель в Якутии //Закономерности развития и дифференциации мерзлотных ландшафтов. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 1993. – С. 98–110.

Гаврильев П.П., Угаров И.С., Ефремов П.В. Мерзлотно-экологические особенности таежных агроландшафтов Центральной Якутии. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2001. – 196 с.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЗАЩИТА РАЗРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ С СИЛЬНОЛЬДИСТЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

А.Ф. Жирков^{*}, М.А. Сивцев

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

** zhirkov_af@mail.ru*

Аннотация. В настоящее время в холодных регионах под влиянием климатических изменений и ростом техногенной нагрузки наблюдается интенсивная деградация многолетнемерзлых пород. Эта проблема крайне актуальна для территорий, где распространены сильнольдистые отложения, и в особенности, где развит ледовый комплекс, который наиболее уязвим. Целью работ являлась оценка деградации и возможности восстановления и защиты разрушенных территорий с сильнольдистыми грунтами в Центральной Якутии путем воссоздания защитного (переходного) слоя. В результате исследований доказана возможность восстановления и защиты разрушенных термокарстом земель с помощью комбинированного способа тепловой защиты, включающего создание теплоизоляционного (восстановление растительного покрова) и теплоемкого (увеличение льдистости грунта) слоев, обеспечивающих оптимальный уровень теплообмена в системе «атмосфера – грунт» в течение трехгодичного цикла для достижения минимальной глубины деятельного слоя грунта. Применение нового способа позволит не только обеспечить скорую рекультивацию нарушенных термокарстом земель, но и сократить объем выбросов углерода за счет снижения степени деградации верхних слоев мерзлых пород.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, ледовый комплекс, деятельный слой, защитный слой, деградация мерзлоты, восстановление защитного слоя.

RESTORATION AND PROTECTION OF DESTROYED TERRITORIES WITH ICE-RICH DEPOSITS IN THE CONDITIONS OF CENTRAL YAKUTIA

A.F. Zhirkov^{*}, M.A. Sivtsev

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

** zhirkov_af@mail.ru*

Abstract. At present, in cold regions, under the influence of climate change and the growth of technogenic load, there is an intensive degradation of permafrost rocks. This problem is extremely relevant for areas where ice-rich deposits are widespread, and in particular, where the ice complex is developed, which is the most vulnerable. The purpose of the work was to assess degradation and the possibility of restoring and protecting devastated areas with ice-rich soils in Central Yakutia by recreating a shielding (transitional) layer. As a result of the research, the possibility of restoring and protecting lands destroyed by thermokarst using a combined method of thermal protection, including the creation of heat-insulating (restoration of vegetation cover) and heat-intensive (increased ground ice content) layers, providing an optimal level of heat transfer in the "atmosphere-soil" system for three annual cycle, to achieve the minimum depth of the active layer. The application of the new method will not only ensure the rapid reclamation of lands disturbed by thermokarst, but also reduce carbon emissions by reducing the degree of degradation of the upper layers of frozen soils.

Keywords: permafrost, ice complex, active layer, shielding layer, permafrost degradation, restoration of the shielding layer.

Наблюдаемое повышение температуры воздуха в арктических и субарктических регионах значительно выше, чем в среднем в мире, что влечет за собой быструю

трансформацию природной среды, в том числе многолетнемерзлых пород (ММП) (IPCC, 2019). Эта проблема крайне актуальна для территорий, где распространены сильнольдистые отложения, и в особенности, где развит ледовый комплекс, который наиболее уязвим к процессам термокарста. Эти процессы очень сильно меняют естественные и техногенные ландшафты и затрудняют эффективное освоение холодных регионов человеком. Уже сегодня наблюдаются последствия деградации сильнольдистых отложений, которые приводят к повреждению зданий и линейных сооружений, разрушению сельхозугодий, пашен и др. Это приводит к огромным экологическим и социально-экономическим издержкам.

Наиболее активно процессы термокарста протекают в открытых природных и антропогенных ландшафтах (*Fedorov et al., 2017*). Такие ландшафты характеризуются тонким (0–0,2 м) защитным слоем (защитный слой — это зона между основанием сезонно-талого слоя и кровлей подземных льдов). А на участках, покрытых бореальным лесом, его толщина достигает 0,7–1 м. В результате современного потепления климата происходит процесс разрушения защитного слоя, который выступает буферной зоной многолетнемерзлых пород от более глубокого протаивания, что приводит к быстрому развитию термокарстовых процессов (*Shur et al., 2005*). Такое положение указывает на необходимость проведения исследований для оценки возможности воссоздания защитного (переходного) слоя для восстановления нарушенных территорий с сильнольдистыми отложениями.

Предлагается комплекс мер для восстановления нарушенных термокарстовыми процессами территорий ледового комплекса путем воссоздания защитного слоя (*Zhirkov et al., 2023*).

Суть эксперимента:

I этап. В конце летнего периода предлагается механически разровнять просевшую дневную поверхность (проведение планировки) бульдозером и спецтехникой. Далее устанавливаются температурные и влажностные логгеры для мониторинга термовлажностного режима грунтов. Определяются реперные точки для наблюдения за динамикой деятельного слоя прямыми методами. В конце сконструированная экспериментальная площадка огораживается.

II этап. Поздней осенью этого же года, перед началом заморозков, планируется проведение оросительных работ для увлажнения ранее разровненной территории до оптимальных значений (в зависимости от количества летних осадков), при которых вся влага в деятельном слое промерзает. Данный этап очень серьезный и ответственный, так как переувлажнение в данном случае грозит усилением процесса термокарста и провалом эксперимента, а недостаточное орошение – получением некондиционных данных. Поэтому,

перед орошением необходимо рассчитать оптимальное количество орошаемой влаги, в зависимости от влажностного режима грунтов.

III этап. Зимой (декабрь, январь) планируется проведение снегоочистительных или снегоуплотнительных работ для получения более глубокого промерзания увлажненных грунтов. Выбор того или иного мероприятия будет зависеть от количества снега в этот период. Выполнение всех необходимых мероприятий при оптимальных расчётных значениях увлажнения должно привести к восстановлению защитного слоя.

IV этап. Весной следующего года, для дальнейшего сохранения восстановленного защитного слоя, требуются незамедлительные рекультивационные мероприятия, в случае сельскохозяйственных территорий – возобновление посевных работ. В естественных ландшафтах – высадка деревьев для создания лесного массива.

В результате исследований доказана возможность восстановления разрушенных термокарстом земель с помощью комбинированного способа тепловой защиты, включающего создание теплоизоляционного (восстановление растительного покрова) и теплоемкого (увеличение льдистости грунта) слоев, обеспечивающих оптимальный уровень теплообмена в системе «атмосфера – грунт» в течение годового цикла для достижения минимальной глубины деятельного слоя грунта. Применение нового способа позволит не только обеспечить скорую рекультивацию нарушенных термокарстом земель, но и сократить объем выбросов углерода за счет снижения степени деградации верхних слоев мерзлых пород. На основании теоретического и натурного экспериментов установлены основные закономерности формирования деятельного слоя грунта при использовании различных вариантов тепловой защиты, подтверждающие эффективность и целесообразность использования предлагаемого способа для широкого внедрения на территориях распространения ледового комплекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-55-15013 НЦНИ_a и госзадания.

Литература

Ефимов А.И., Граве Н.А. Погребенные льды района озера Абалах // Социалистическое строительство. – 1940. – № 10-11. – С. 65–78.

Fedorov, A.N.; Iwahana, G.; Konstantinov, P.Y.; Machimura, T.; Argunov, R.N.; Efremov, P.V.; Lopez, L.M.C.; Takakai, F. Variability of permafrost and landscape conditions following clear cutting of larch forest in Central Yakutia. *Permafrost. Periglac. Process.* 2017, 28, 331–338.

Shukla, P.; Skea, J.; Slade, R.; van Diemen, R.; Haughey, E.; Malley, J.; Pathak, M.; Pereira, J.P. Technical Summary. In *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*; Shukla, P., Skea, J., Buendia, E.C., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2019, in press.

Shur, Y.; Hinkel, K.M.; Nelson, F.E. The transient layer: Implications for geocryology and climate-change science. *Permafr. Periglac. Process.* 2005, 16, 5–17.

Zhirkov, A.; Sivtsev, M.; Lytkin, V.; Kirillin, A.; Séjourné, A.; Wen, Z. An Assessment of the Possibility of Restoration and Protection of Territories Disturbed by Thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia. *Land* 2023, 12, 197. <https://doi.org/10.3390/land12010197>.

ВЛИЯНИЕ ЭКЗОГЕННЫХ И ЭНДОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СЕЙСМИЧНОСТЬ ЛЕДОВЫХ КУПОЛОВ (АРХ. СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ)

Я.В. Конечная^{1,2*}, Г.Н. Антоновская¹, Н.К. Капустян^{1,3}, Е.Р. Морозова¹

*1 – Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. акад. Н. П. Лаверова УрО РАН, г. Архангельск, Россия*

*2 – Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской
академии наук», г. Обнинск, Россия*

3 – Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта, г. Москва, Россия

** yanakon@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются различные типы сейсмических событий ледниковой природы. Проведена оценка локации и миграции событий, имеющих фазы объемных Р- и S-волн, определен их частотный состав. Показано, что число импульсных колебаний зависит от температуры воздуха, и они происходят в основном вдоль береговой линии вблизи станции.

Ключевые слова: сейсмические события, ледовые купола, импульсные колебания.

INFLUENCE OF EXOGENOUS AND ENDOGENOUS FACTORS ON THE ICE SHEETS SEISMICITY (THE SEVERNAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO).

Ya.V. Konechnaya^{1,2*}, G.N. Antonovskaya¹, N.K. Kapustyan^{1,3}, E.R. Morozova¹

1 – FECIAR UB RAS, Arkhangelsk, Russia

2 – GS RAS, Obninsk, Russia

3 – IPE RAS, Moscow, Russia

** yanakon@mail.ru*

Abstract. The article presents different types of seismic events of a glacial nature. The location and migration of events with body P- and S-waves has been evaluated. Their frequency composition is determined. The number of registered impulse oscillations depends on the air temperature. They occur mainly along the coastline near the seismic station.

Keywords: seismic events, ice sheets, impulse events.

Сейсмическая станция «Северная Земля» (SVZ) Архангельской сейсмической сети была открыта в ноябре 2016 г. и функционирует в настоящее время. За весь период наблюдений станцией были зарегистрированы региональные землетрясения в основных сейсмоактивных регионах Арктики, а также огромное количество импульсных колебаний, которые обычно относят к ледовой сейсмичности. Все ледовые сейсмические события можно разделить на два типа по частотному составу, интенсивности и длительности: события с Р- и S-волнами и шумоподобные цуги длительностью до 10 с. Целями проведения наблюдений являются, во-первых, разделение землетрясений и ледниковых событий (очистка сейсмического каталога), во-вторых, фундаментальная задача изучения ледовых процессов планеты и их связь с геосферами.

События с Р- и S-волнами можно также разделить на 2 группы А и В (рис. 1) по волновым формам: выделению основных волн, уровню и частотному составу межволнового

фона. Различия волновых форм наиболее ярко проявляются при спектрально-временном анализе (см. рис. 1). Группа *A* имеет достаточно четкие вступления Р- и S-волн, причем S всегда интенсивнее Р. В работе (Köhler A. et al., 2015) приведены похожие волновые формы для событий архипелага Шпицберген, они определяются авторами как землетрясения. У группы событий *B* Р-волна выражена более слабо, отсутствуют поверхностные волны и наблюдается высокочастотный шум (~20 Гц) между вступлениями волн.

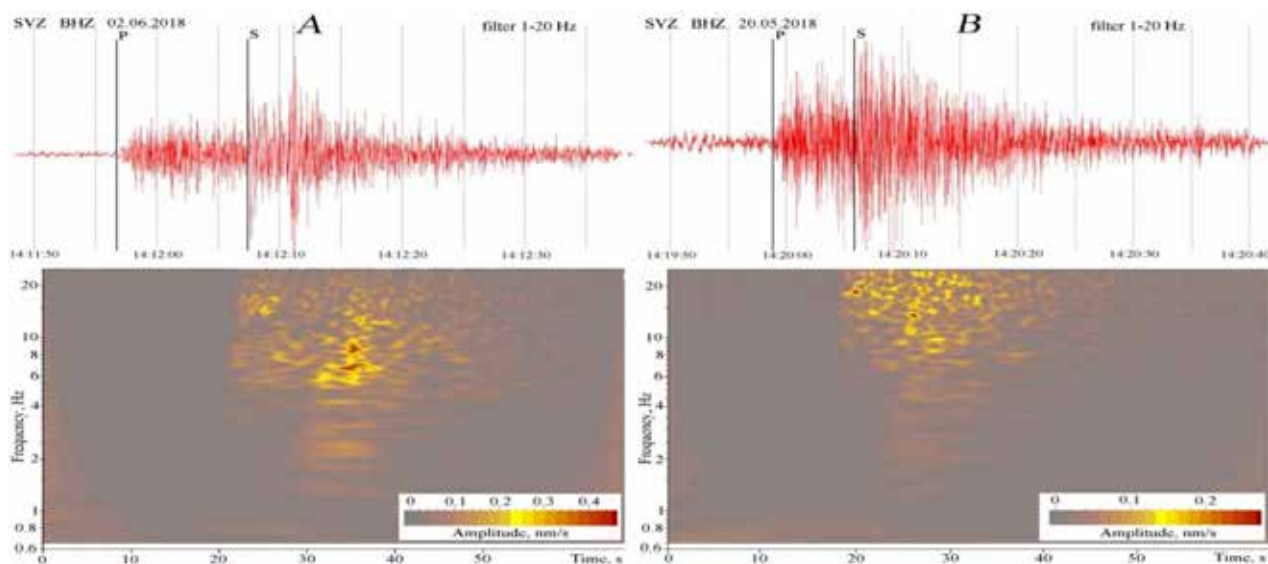


Рисунок 1. Записи сейсмостанции SVZ: волновые формы (вверху) и СВАН (внизу) локальных сейсмических событий групп *A* и *B*.

Локация событий групп *A* и *B* (рис. 2, а) показывает, что распределение эпицентров соотносится как с ледниковыми куполами, так и с разломными структурами, а также дает линейную структуру (ось I-I' на рис. 2, а). Для точек группы *A* при расчетной глубине очага $h = 0$ км линейная структура расположена юго-западнее таковой для группы *B*. При задании глубины $h = 25$ км для группы *A* происходит совмещение положения этих структур. Анализ миграции эпицентров вдоль оси I-I' (рис. 2, б) показывает, что события группы *B* запаздывают относительно группы *A* и занимают более компактную область. Такое возможно, если предположить, что коровые землетрясения провоцируют процессы деструкции в наиболее ослабленной зоне ледовых куполов, причем деформирующее льды воздействие имеет скорость $\sim 10^{-4}$ км/час.

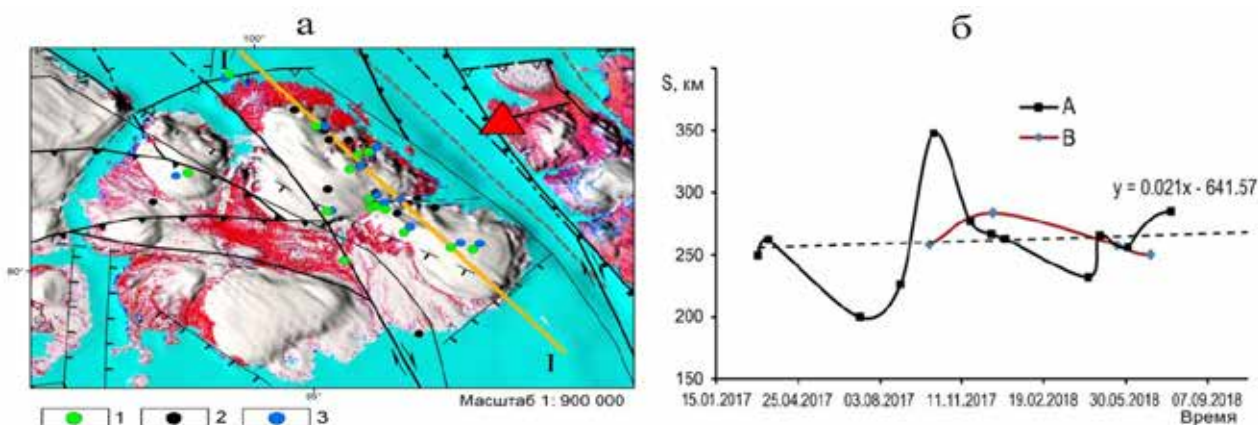


Рисунок 2. Положение эпицентров локальных событий о. Октябрьской Революции (слева) и миграция эпицентров вдоль линии I-I' (справа). Расчеты при глубине очага: группа A $h = 0$ км (1) и $h = 25$ км (3); 2 – группа B $h = 0$ км; обозначение тектонических элементов стандартное.

Импульсные колебания – события этого типа отмечались нами в зимнее время как на континентальных станциях сети, так и на островных. Было замечено, что их появление и характеристики связаны с погодными условиями, прежде всего ходом температуры воздуха. Этот тип сейсмичности разумно описывать временным ходом двух параметров, рассчитанных за сутки: количеством событий и мощностью (энергией). Сравнение временных вариаций параметров сейсмического процесса и температуры (рис. 3, а) позволяет предположить разный механизм при отрицательных и положительных температурах. Это отражено в разном наклоне «графиков повторяемости» (рис. 3, б).

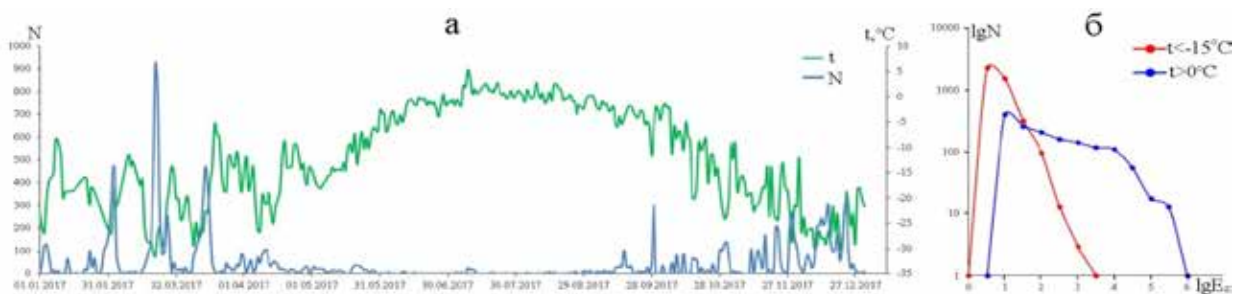


Рисунок 3. Влияние экзогенных факторов на сейсмичность: а – временные вариации температуры воздуха и сейсмичности (количества событий и мощности); б – график связи количества событий и их мощности для разных температур.

Большое число событий, превосходящих фон, при относительно низкой средней мощности указывает на процессы образования более крупных трещин при низких температурах, особенно ниже -15°C . Наблюдается корреляция минимумов температуры и максимумов количества событий (рис. 3, а). Полученное распределение азимутов для периода с 18 по 22 февраля 2017 г. показывает, что импульсные события «приходят» либо с береговой линии, либо, в редких случаях, со стороны озер, расположенных на о. Большевик. Наличие при положительных температурах малого числа событий при большой удельной

энергии говорит о возможной приповерхностной деградации льда при системе мелких трещин.

Несомненно, сейсмологические данные дают основу для мониторинга состояния ледовых толщ. Тем не менее, повышение чувствительности регистрации региональных землетрясений на арктических архипелагах практически не позволяет избежать регистрации ледовых событий. Поэтому следует уделять внимание детальному изучению ледовых событий, что возможно даже по данным единичной станции при тщательном анализе всей записи. При этом существенный результат дает комплексирование сейсмологических и метеорологических наблюдений.

Литература

Köhler A., Nuth C., Schweitzer J., Weidle C., Gibbons S.J. (2015) Regional passive seismic monitoring reveals dynamic glacier activity on Spitsbergen, Svalbard // Polar Research. 34:1, 26178. DOI: 10.3402/polar.v34.26178.

ВЛИЯНИЕ ЗИМНИХ УСЛОВИЙ НА МЕЖГОДОВУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ

**П.Я. Константинов^{1,2*}, А.Н. Федоров¹, Н.И. Башарин^{1,2}, И.С. Угаров¹, М.И. Петров¹,
А.П. Кондаков¹**

1 – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

2 – Томский государственный университет, г. Томск, Россия

** konstantinov@mpi.ysn.ru*

Аннотация. На нескольких экспериментальных участках ИМЗ СО РАН в разных природных зонах получены корреляционные зависимости глубины сезонного протаивания с суммой летних температур воздуха (индексом протаивания) и средней годовой температурой верхней поверхности многолетнемерзлых пород. В рассмотренных ландшафтах субарктической и бореальной зон корреляция глубины протаивания со средней годовой температурой грунта, которая больше зависима от зимних условий, превышает корреляцию с индексом протаивания. Зависимость глубины протаивания от грунтовой температуры в выбранных ландшафтах оказалась больше на более южном участке криолитозоны.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, температура, глубина сезонного протаивания, индекс протаивания.

INFLUENCE OF WINTER CONDITIONS ON THE INTERANNUAL VARIABILITY OF THE SEASONAL THAWING DEPTH

**P.Ya. Konstantinov^{1,2*}, A.N. Fedorov¹, N.I. Basharin^{1,2}, I.S. Ugarov¹, M.I. Petrov¹,
A.P. Kondakov¹**

1 – Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

2 – Tomsk State University, Tomsk, Russia

** konstantinov@mpi.ysn.ru*

Abstract. Correlation dependences of the depth of seasonal thawing with sum of summer air temperatures (thawing index) and the average annual temperature of the permafrost table have been obtained at several experimental sites of MPI SB RAS in different natural zones. In the considered landscapes of the subarctic and boreal zones, the correlation of the thaw depth with the average annual ground temperature, which is more dependent on winter conditions, exceeds the correlation with the thawing index. The dependence of the thawing depth on the ground temperature in the selected landscapes turned out to be greater in the more southern part of the permafrost zone.

Keywords: permafrost, temperature, seasonal thawing depth, thawing index.

Теплосодержание грунтовой толщи в конце зимнего сезона может быть разным из-за межгодовой изменчивости сумм отрицательных температур воздуха и высоты снежного покрова. После холодных и малоснежных зим, вызывающих сильное охлаждение грунтовой толщи, большая часть приходящего тепла будет тратиться на ее прогрев, что уменьшит долю грунтового теплопотока на протаивание почвогрунтов. Наоборот, после теплых и многоснежных зим, в связи меньшими затратами явного тепла создаются лучшие энергетические возможности для более глубокого протаивания грунтов.

Первые экспериментальные данные о большом значении зимних условий на глубину сезонного протаивания почвогрунтов были получены *А.П. Богатыревым (1974)* на Таймыре. С середины 90-х годов прошлого века, с началом глобального международного проекта «Circumpolar Active Layer Monitoring program» (CALM), объем фактического материала о межгодовой изменчивости глубины протаивания резко возрос. Данные по зависимости мощности сезонно-талого слоя (СТС) от зимних условий в разных ландшафтах криолитозоны были получены в Центральной Якутии (*Скрябин и др., 1998; Варламов и др., 2002; Константинов и др., 2006, 2014*), на Колымской низменности (*Федоров-Давыдов и др., 2004*), на Канадском Севере (*Burn, Zhang, 2010; Bonnaventure, Lamoureux. 2013; Duchesne et al., 2015*), на Шпицбергене (*Schuh et al., 2017; Strand et al., 2021*) и на севере Швеции (*Akerman, Johansson, 2008*). На большую зависимость мощности СТС от условий зимнего сезона показывают и результаты численного моделирования, проведенного на базе мониторинга в северо-западной Канаде (*Burn, Zhang, 2010*).

На нескольких экспериментальных участках ИМЗ СО РАН в разных природных зонах получены корреляционные зависимости глубины сезонного протаивания с индексом протаивания и средней годовой температурой верхней поверхности многолетнемерзлых пород ($MAGT_{PT}$) (табл. 1). Как известно, последняя в криолитозоне определяется в основном

Таблица 1

Корреляционные зависимости глубины сезонного протаивания с индексом протаивания и средней годовой температурой верхней поверхности ММП

Статистический показатель	Участок субарктической тундры у пос. Тикси		Луговой ландшафт около г. Якутска	
	F_f	$MAGT_{PT}$	F_f	$MAGT_{PT}$
R	0.54	0.59	0.44	0.83
R^2	0.29	0.35	0.19	0.70
T-Test	2.51	2.86	1.69	5.29
α	2.13	2.13	2.19	2.18

Обозначения: F_f – индекс протаивания (сумма градусо-суток с положительными температурами в течение года); $MAGT_{PT}$ – средняя годовая температура верхней поверхности ММП; R – коэффициент корреляции; R^2 – коэффициент детерминации; T-Test – t-критерий Стьюдента; α – критическое значение t-критерия Стьюдента при уровне значимости 0.05.

зимними условиями. Как видно из приведенных данных, в отдельных ландшафтах субарктической и бореальной зон корреляция глубины протаивания с $MAGT_{PT}$ превышает корреляцию с индексом протаивания. Зависимость глубины протаивания от $MAGT_{PT}$ в выбранных ландшафтах оказалась больше на более южном участке криолитозоны. При этом корреляционная зависимость мощности СТС от индекса протаивания на луговом участке около г. Якутска оказалась даже статистически не значимой. Однако полученные корреляционные зависимости нельзя считать доминирующими в рассмотренных районах. Имеющиеся к настоящему времени фактические данные (Федоров-Давыдов и др., 2004; Schuh et al., 2017; Strand et al., 2021) свидетельствуют, что даже на относительно небольших по площади территориях нельзя выделить один ведущий метеорологический фактор, оказывающий наибольшее влияние на межгодовую изменчивость глубины протаивания почвогрунтов. Разные ландшафты могут давать различный отклик глубины сезонного протаивания на те или иные метеорологические факторы.

Литература

- Богатырев Л.Г. Динамика оттаивания мерзлоты в тундровых почвах стационара «Агапа» // Почвы и продуктивность растительных сообществ. – М.: Изд-во МГУ, 1974. – Вып. 2. – С. 67–73.
- Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н. Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2002. – 218 с.
- Константинов П.Я., Аргунов Р.Н., Герасимов Е.Ю., Угаров И.С. О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов // Криосфера Земли. – Т. IV, № 3. – 2006. – С. 15–22.
- Константинов П.Я., Федоров А.Н., Угаров И.С., Аргунов Р.Н., Суздалов Д.А., Й. Йижима. Результаты исследования межгодовой изменчивости глубины сезонного протаивания около г. Якутска // Криосфера Земли. – 2014. – Т. XVIII, № 4. – С. 23–32.
- Скрябин П.Н., Варламов С.П., Скачков Ю.Б. Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов района Якутска. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – 144 с.
- Федоров-Давыдов Д.Г., Давыдов С.П., Давыдова А.И. и др. Пространственно-временные закономерности сезонного протаивания почв на севере Колымской низменности // Криосфера Земли. – Т. VIII, № 4. – 2004. – С. 15–26.
- Akerman H.J., Johansson M. Thawing permafrost and thicker active layers in sub-arctic Sweden // Permafrost and Periglacial Processes. Vol.19, Issue 3 – 2008 – Pp. 261–331.
- Bonnaventure P.P., Lamoureux S.F. The active layer: a conceptual review of monitoring, modelling techniques and changes in a warming climate // Progress in Physical Geography. Vol. 37 – 2013 – Pp. 352–376.
- Burn C.R., Zhang Y. Sensitivity of active-layer development to winter conditions north of treeline, Mackenzie delta area, western Arctic coast // Proceedings GEO2010, 63rd Canadian Geotechnical Conference and the 6th Canadian Permafrost Conference. Calgary, Sept 2010. GEO2010 Calgary Organizing Committee – 2010 – Pp. 1458–1465.
- Duchesne C, Smith S, Ednie M, Bonnaventure P. Active layer variability and change in the Mackenzie Valley, Northwest Territories // Proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conf. and Seventh Canadian Conf. on Permafrost (GEOQuébec 2015), Paper 117 – 2015.
- Morse P.D., Burn C.R., Kokelj S.V. Influence of snow on near-surface ground temperatures in upland and alluvial environments of the outer Mackenzie Delta, Northwest Territories // Canadian Journal of Earth Sciences. Vol. 49. – 2012 – Pp. 895–913.
- Schuh C., Frampton A., Christiansen H.H. Soil moisture redistribution and its effect on inter-annual active layer temperature and thickness variations in a dry loess terrace in Adventdalen, Svalbard // Cryosphere. Vol. 11(1) – 2017. – Pp. 635–651.
- Strand S.M., Christiansen H.H., Johansson M. et al. Active layer thickening and controls on interannual variability in the Nordic Arctic compared to the circum-Arctic // Permafrost and Periglacial Processes. Vol. 32. – 2021. – Pp. 47–58.

УГЛЕРОД МИКРОБНОЙ БИОМАССЫ В ПОЧВАХ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ И ТЕРМОКАРСТОВЫХ ПОНИЖЕНИЙ ЮГА ВИТИМСКОГО ПЛОСКОГОРЬЯ

Ц.Д.-Ц. Корсунова*, Э. О. Чимитдоржиева, Г. Д. Чимитдоржиева

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

**zinakor23@yandex.ru*

Аннотация. Криогенный характер почв, несомненно, накладывает отпечаток на содержание углерода микробной биомассы. Глобальное потепление климата привело к сильно расчлененному рельефу в виде бугров пучений и термокарстовых понижений, где первой реакцией ландшафтов на изменение экологических условий является отклик биоты. Целью работы было определение углерода микробной биомассы в почвах с расчлененным рельефом юга Витимского плоскогорья. Полученные данные характеризуют направление и интенсивность микробиологических процессов вдоль профильных горизонтов. Подобные исследования необходимы для оценки влияния климатических факторов на почвенный микробный комплекс.

Ключевые слова: бугры, термокарстовые понижения, углерод микробной биомассы.

CARBON OF MICROBIAL BIOMASS IN SOILS OF FROST HILLS AND THERMOKARST DEPRESSIONS IN THE SOUTH OF THE VITIM PLATEAU

Ts. D-Ts. Korsunova, E. O. Chimitdorzieva, G. D. Chimitdorzieva

Institute of General and Experimental Biology, Ulan-Ude, Russia

**zinakor23@yandex.ru*

Abstract. Abstract. The cryogenic nature of soils undoubtedly affects the carbon content of microbial biomass. Global climate warming has led to a highly dissected topography in the form of frost bumps and thermokarst depressions, where the first response of landscapes to changing environmental conditions is the response of biota. The aim of the work was to determine the carbon of microbial biomass in soils with dissected relief in the south of the Vitim Plateau. The data obtained characterize the direction and intensity of microbiological processes along the profile horizons. Such studies are necessary to assess the influence of climatic factors on the soil microbial complex.

Keywords: frost bumps, thermokarst depressions, microbial biomass carbon.

Объектами исследования послужили почвы бугров пучения (БГ) и термокарстовых понижений (ТП). В ходе исследования выбраны экспериментальные площадки (ЭП) с ярко выраженными криогенными явлениями.

Интенсивность микробиологической активности по горизонтам почвенного профиля определяли по содержанию углерода микробной биомассы. В задачи наших исследований входило определение величины углерода микробной биомассы (С_{мб}) регидратационным методом в почвах (*Благодатский и др., 1987*). Подробное морфологическое описание исследуемых почв дано (*Чимитдоржиева, 2019*).

В почвах БГ среднее содержание С_{мб} составляет 100,89±29,98 при коэффициенте вариации 72,78 %. Следует отметить, что в процессе пучения происходят движения воздушной и водной масс, почвенного раствора органо-минеральных соединений с разной реакцией среды, при которых создаются микро- и макрозоны с соответственно адаптированной микробиотой. В почвах с бугров пучения в верхнем (0–10 см) слое найдено С_{мб} в значительном количестве (191,7 мг/100 г). Содержание в слое 70–80 см составляет 72,92 мг/100 г., т.е. в 17 раз больше показателя на одноименной глубине термокарстовых понижений.

В некоторых буграх пучения содержание С_{мб} низкое, что связано со скудной растительностью и сухостью почвенного профиля. Максимальный показатель по профилю почв таких бугров составляет всего 46 мг на 100 г почвы.

Распределение содержания С_{мб} по профилю почв криоморфозов неравномерное. Выявлена общая закономерность – уменьшение показателя в слое 20–30 см, в слое 50–60 см его количество увеличивается, в некоторых случаях – до 100–200 мг на 100 г почвы. В почвах ТП среднее содержание С_{мб} составляет 138,2, коэффициент вариации равен 73,81 %. Столь высокие значения коэффициентов вариации обусловлены особенностями распределения питательных веществ в профиле почв, а также зависят от гидротермических условий.

Максимальное количество (С_{мб}) обнаружено в почвах термокарстовых понижений на глубине 10–20 см – 210,4, что объясняется обилием ризосферной микрофлоры во время многолетнего процесса высыхания озера, содержание С_{мб} здесь самое высокое. С глубиной обнаружена тенденция снижения углерода общей массы – почти в 6–7 раз, уменьшается его количество – до 27,6 и 33,9 мг/100 г. В слое 70–80 см его количество падает до 4,2 мг/100 г.

В фоновых квазиглеевых черноземах распределение С_{мб} по профилю относительно равномерное, с максимальным значением 174 мг/100 г в слое 30–40 см. Среднее значение С_{мб} по профилю $164 \pm 4,63$, при коэффициенте вариации всего 5,64 %.

Нами проанализированы почвы с двух бугров (Б4 и Б5), с вершин северного и южного склонов. Почва с Б5 в 0–10 см слое – средний суглинок гран. состава, рыхлый, где обнаружено в июле в 0–10 слое в период максимального прогревания 191,7 мг/100 г С_{мб}. А в следующем бугре Б4, где отмечается сухая супесчаная почва плотного сложения, этот показатель значительно ниже – 13,5 мг. На северном склоне, где отмечается лучшее увлажнение в 0–10 слое, его значение – 183,3. На южном склоне в верхнем слое вследствие сухости это значение меньше – 112,5 мг. При сравнении содержимого следующего горизонта (10–20 см), обнаруживается уменьшение на вершине склона до 20,8 мг, на южном склоне – до 64,1, тогда как на северном остается количество высоким – 200 мг/100 г, объяснимое лучшим увлажнением. На глубине 20–30 см ощущается еще ниже этот показатель – 6,3 на вершине склона, на южном склоне – 27, на северном – больше, 66,7 мг. Глубже, в горизонтах 30–40 см и 40–50 см вновь возрастает микробная биомасса на всех вариантах из-за увеличения влаги и микрофлоры, адаптированной к нему. При сравнении микробной биомассы с таких фоновых почв, в последних на всех глубинах ее величина сравнительно одинакова, так как микробный ценоз сформирован и функционирует в рамках сложившихся природно-климатических условий и находится в стойком равновесном состоянии,

свидетельствуя об отсутствии трансформации почвенной, воздушной, органоминеральной субстанции из глубин.

Исследования выполнены за счет средств бюджета по теме госзадания № 121030100228–4; аналитические работы при финансовой поддержке в рамках гранта РФФИ №16–04–01297.

Литература

Благодатский, С. А., Благодатский, Е. В., Горбенко, А. Ю., Паников, Н.С. Регидратационный метод определения микробной биомассы в почве / С. А. Благодатский [и др.] // Почвоведение. – 1987. – № 4. – С. 64–71.

Чимитдоржиева, Г. Д., Чимитдоржиева, Э. О., Милхеев, Е. Ю., Цыбенков, Ю.Б., Егорова, Р.А., Солдатова, З. А., Андреева, Д. Б., Корсунова, Ц. Д-Ц., Давыдова, Т. В., Дмитриев, А. В., Чимитдоржиев, Т. Н. / Почвы криогенных форм рельефа на юге Витимского плато: распространение и роль в распределении пулов почвенного углерода / Г. Д. Чимитдоржиева [и др.] // Почвоведение. – 2019. – № 9. – С. 1029–1038.

ФАКТОРЫ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ НАЛЕДЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ НА ПРИМЕРЕ АНМАНГЫНДИНСКОЙ НАЛЕДИ **О.М. Макарьева^{1*}, А.А. Землянскова¹, А.Н. Шихов², Н.В. Нестерова^{1,3}, А.А. Осташов³, В.Р. Алексеев⁴**

1 – Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

2 – Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

3 – Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

4 – Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

** omakarieva@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты анализа факторов временной изменчивости характеристик гигантской Анмангындинской наледи (Магаданская область) за период 1962- 2022 гг. Максимальные размеры наледи сократились на 14,8 % и 17,4 % для площади и объема соответственно. Выявлено значительное сокращение сроков сезонного существования наледи. Показана роль повышения температуры воздуха и изменения режима формирования снежного покрова в трансформации наледных процессов.

Ключевые слова: гигантские наледи, динамика наледей, изменение климата, Анмангындинская наледь.

FACTORS OF LONG-TERM VARIABILITY OF SPRING AUFEIS IN THE NORTH-EAST OF RUSSIA BY THE EXAMPLE OF THE ANMANGYNDIA AUFEIS

O.M. Makarieva^{1*}, A.A. Zemlianskova¹, A.N. Shikhov², N.V. Nesterova^{1,3}, A.A. Ostashov³, V.R. Alexeev⁴

1 – St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

2 – Perm State University, Perm, Russia

3 – State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

4 – Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia

** omakarieva@yandex.ru*

Abstract. The results of the analysis of the factors of temporal variability of the characteristics of the giant Anmangynda aufeis (Magadan region) for the period 1962- 2022 are presented. Maximum aufeis sizes decreased by 14,8% and 17,4% for area and volume, respectively. A significant reduction in the periods of seasonal existence of aufeis field has been revealed. The role of the increase in air temperature and changes in the regime of snow cover formation in the transformation of icing processes is shown.

Keywords: giant aufeis, aufeis dynamic, climate change, the Anmangynda aufeis.

Северо-Восток России характеризуется широким распространением гигантских наледей подземных вод, площадь которых может достигать десятков км² (*Атлас, 2021*). Первой и наиболее фундаментальной работой по систематизации данных о гигантских наледях Северо-Востока стали Кадастр и Карта наледей Северо-Востока (*Симаков, Шильниковская, 1958*). *Кадастр (1958)* содержит сведения о местоположении и размерах наледей площадью более 0,01 км². В качестве площади наледей указывалась максимальная площадь наледной поляны, дешифрованная по геоморфологическим признакам.

Материалы *Кадастра (1958)* были использованы многими учеными для формирования представлений о геокриологических условиях, ресурсах подземных вод криолитозоны Северо-Востока, взаимосвязи подземных и поверхностных вод в регионе (*Толстухин, 1966; Соколов, 1975; Корейша, 1986*). Обобщались данные о распространении и площади наледей (на самом деле, наледных полян), оценивались объемы наледей, по ним определялись запасы подземных вод и пр. (*Гидрогеология СССР, 1970, 1972*).

Обновление данных о гигантских наледях в современный период для бассейна р. Индигирки было выполнено авторами исследования на основе дешифрирования снимков Landsat 2016-2017 гг. (*Макарьева и др., 2019*). Результаты обобщения современных и исторических данных о площади наледей в бассейнах крупных рек Северо-Востока (Яна, Индигирка, Колыма, Пенжина) представлены в (*Атлас, 2021; Макарьева и др., 2022*). Они показали, что современное количество наледей в 1,3- 1,5 раза больше, чем выявлено ранее в *Кадастре (1958)*, а общая максимальная площадь наледей уменьшилась в 1.6–2.4 раза, в зависимости от бассейна реки (*Атлас, 2021*).

В 30 км от пос. Усть-Омчуг (Магаданская область) ежегодно формируется гигантская наледь в долине р. Анмангында площадью до 6 км², размеры наледной поляны оцениваются в 7,6 км² (*Макарьева и др., 2021*). В период 1962–1990 гг. на этом объекте проводились режимные наблюдения за динамикой площади, мощности льда и другими параметрами. Исторические материалы были дополнены данными, полученными на основе анализа космических снимков Landsat и Sentinel за период 2000–2022 гг., а также результатами полевых исследований, выполненных в 2020–2022 гг. (*Землянкова и др., 2023*); была рассмотрена временная изменчивость характеристик Анмангындинской наледи.

Результаты показали, что за последние 60 лет максимальные размеры наледи до начала таяния сократились на 14,8 % и 17,4 % для площади и объема соответственно. Так, в исторический период (1963- 1990 гг.) площадь наледи изменялась от 4,3 до 6,8 км², а объем от 5,3 до 11,7 млн м³. В современных климатических условиях (2000- 2022 гг.) величина площади варьируется в пределах 3,5- 5,4 км², а рассчитанный объем может составлять

5,0- 8,2 млн м³. Период таяния наледи в среднем сократился на 34 дня. По данным спутниковых снимков, формирование наледи происходит значительно медленнее, чем в исторический период. Об этом свидетельствует небольшая площадь разлива наледных вод (2013- 2022 гг.) по сравнению с площадью льда в период с октября по декабрь (1962- 1968 гг.).

Анализ метеорологических условий по данным ближайшей метеорологической станции показал, что температура воздуха и количество осадков увеличились. Наибольшие изменения произошли в предзимний период. Снежный покров устанавливается раньше и его толщина в современный период больше. Выявлена связь между средней температурой воздуха за август – ноябрь и характеристиками наледи как в исторический, так и в современный период. Анализ суммы осадков за ноябрь-декабрь показал среднюю связь с параметрами наледи, но она статистически не значима для периода (1962- 1990 гг.). Связь метеорологических условий современного периода (2000- 2022 гг.), такие как средняя температура воздуха за ноябрь-декабрь и сумма осадков за тот же период, с площадью наледи подтверждается средней достоверной корреляцией (- 0,58 и - 0,53, соответственно). Связь между характеристиками наледи и расходом воды р. Анмангында не обнаружена.

Для труднодоступных районов Северо-Востока гигантские наледи являются индикаторами состояния криолитозоны. Выявление причин многолетней динамики их характеристик, имеющей тенденцию к уменьшению, является актуальной научной задачей, решение которой может быть связано с комплексным мониторингом отдельных репрезентативных объектов, например, Анмангындинской наледи, на которой наблюдения начались в 1962 г. и возобновлены авторским коллективом в 2020 г.

Исследование выполнено при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект 75295776).

Литература

Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России // В.Р. Алексеев, О.М. Макарьева, А.Н. Шихов, Н.В. Нестерова, А.А. Осташов, А.А. Землянскова; отв. редакторы В.В. Шепелев, М.Н. Железняк; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова. Новосибирск: СО РАН, 2021. – 302 с. ISBN 978-5-6046428-2-5

Гидрогеология СССР. Т. 20: Якутская АССР / Под ред. А.И. Ефимова, И.К. Зайцева. – М., Недра, 1970. – 383 с. (О наледях – с. 61–76).

Гидрогеология СССР. Т. 26: Северо-Восток СССР / Под ред. О.Н. Толстихина. – М., Недра, 1972. – 297 с. (О наледях – с. 69–91).

Землянскова А.А., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962–2021 гг.) // Лед и снег. – 2023. – Т. 26: Северо-Восток СССР. – Т. 63 (1). – С. 71- 84.

Корейша М. М. Закономерности развития наземных льдов в условиях резко континентального климата: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. – М., 1986. – 45 с.

Макарьева О. М., Шихов А. Н., Осташов А. А., Нестерова Н. В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам «Landsat» и историческим данным // Лед и Снег. – 2019. – Т. 59, № 2. – С. 201–212.

Макарьева О.М., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Землянскова А.А., Семакина А.В. Картирование наледей Северо-Востока России // Криосфера Земли. – 2022. – Т. XXVI, № 4. – С. 47–58. DOI: 10.15372/KZ20220404

Симаков А. С., Шильниковская З. Г. Карта наледей Северо-Востока СССР. Краткая объяснительная записка. Северо-Восточное геологическое управление Главного управления геологии и охраны недр при Совете Министров РСФСР. – Магадан, 1958. – 40 с.

Соколов Б. Л. Наледи и речной сток. – Л., Гидрометеиздат, 1975. – 190 с.

Толстихин О. Н. О возможности использования площадей наледей для ориентировочной оценки ресурсов подземных вод (на примере Верхояно-Колымской складчатой области) // Методика гидрогеологических исследований и ресурсы подземных вод Сибири и Дальнего Востока. – М., Наука, 1966. – с. 74–88.

Makarjeva O.M., Nesterova N.V., Ostashov A.A., Zemlyanskova A.A., Tumskoy V.E., Gagarin L.A., Ekaikin A.A., Shikhov A.N., Olenchenko V.V., Khristoforov I.I. Perspectives of the development of complex interdisciplinary hydrological and geocryological research in the North-East of Russia // Vestnik of SPbSU. Earth Sciences – 2021 – V. 66 – № 1 – P. 74–90. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.105>.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕРЗЛЫХ ТОЛЩ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Г.В. Малкова^{1*}, Д.С. Дроздов^{1,2,3}, А.А. Васильев^{1,2}, О.Е. Пономарева^{1,3}, А.Г. Гравис^{1,3}

1 – Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия

2 – Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

3 – Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ), Москва, Россия

**galina_malk@mail.ru*

Аннотация. Климатические изменения в западном секторе Российской Арктики идут ускоренными темпами. По данным метеостанций, за последние 30 лет XX века тренд повышения среднегодовой температуры воздуха в среднем составлял 0,034 °С/год. За 22 года XXI в. средний тренд увеличился почти в четыре раза и достиг 0,125°С/год. Среднегодовая температура ММП на глубине 10 м за весь период наблюдений повысилась на 1,5...2 °С. В различных криогенных ландшафтах западного сектора Российской Арктики в XXI веке тренды среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород всегда меньше тренда повышения температуры воздуха и в настоящее время отстают от него в среднем в два раза. В XXI веке, несмотря на ускорение темпов потепления климата, зафиксировано уменьшение коэффициента чувствительности криолитозоны K_a в два раза.
Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, среднегодовая температура воздуха и пород, потепление климата, тренды изменения температуры.

TEMPERATURE REGIME AND SENSITIVITY OF PERMAFROST UNDER MODERN CLIMATE WARMING

G.V. Malkova^{1*}, D.S. Drozdov^{1,2,3}, A.A. Vasiliev^{1,2}, O.E. Ponomareva^{1,3}, A.G. Gravis^{1,3}

1 – Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Center of the SB RAS, Tyumen, Russia

2 – Tyumen State University, Tyumen, Russia

3 – Russian State Geological Prospecting University (MGRI), Moscow, Russia

**galina_malk@mail.ru*

Abstract. Climate changes in the western sector of the Russian Arctic are proceeding at an accelerated pace. According to weather stations over the last 30 years of the twentieth century, the average value of the trend of increase in the average annual air temperature was equal to 0.034°C/year. For 22 years of the XXI century, the average trend has increased almost fourfold and reached 0.125°C/year. The average annual temperature of the permafrost for the entire observation period increased by 1.5 ...2°C. In various cryogenic landscapes of the western sector of the Russian Arctic in the XXI century, trends in the average annual temperature of permafrost are always less than the trend of increasing air temperature, and currently lag behind it by an average of two times. In the XXI century, despite the acceleration of the rate of climate warming, a two-fold decrease in the sensitivity coefficient of the cryolithozone K_a was recorded.

Keywords: permafrost, average annual temperature of air and permafrost, climate warming, temperature trends.

Общие тенденции изменения климата и криолитозоны Европейской территории России и севера Западной Сибири оказываются очень схожими и однонаправленными. По классификации Росгидромета, западный сектор Российской Арктики входит в единый (квази-однородный) климатический регион (*Доклад об особенностях климата...*, 2022). На графиках изменения среднегодовой температуры воздуха хорошо видно, что в скорости изменения среднегодовой температуры воздуха в конце 1990-х годов произошел заметный перелом: в XXI веке отмечается увеличение тренда в два и более раз по сравнению с тридцатилетним периодом конца XX века (рис. 1). По данным метеостанций за последние 30 лет XX века тренд повышения среднегодовой температуры воздуха (α_a) изменялся от слабоотрицательного (-0,013 °C/год) до 0,055 °C/год, а в среднем составлял 0,034 °C/год. В XXI веке за 22-летний период тренд α_a варьирует от 0,110 до 0,152 °C/год, в среднем увеличился почти в четыре раза и достиг 0,125 °C/год (рис. 1, табл. 1).

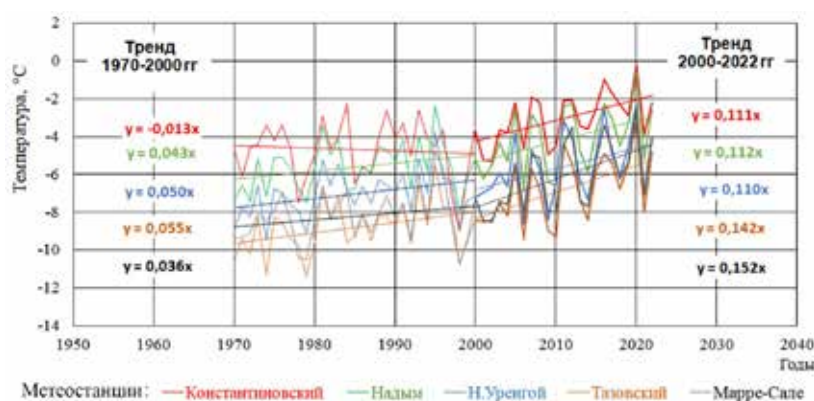


Рисунок 1. Изменение среднегодовой температуры воздуха (использованы метеоданные с сайтов <http://meteo.ru/data> и https://rp5.ru/Погода_в_России).

Таблица 1

Тренды изменения среднегодовой температуры воздуха и ММП

Номер и название стационара	Тренд $T_{\text{возд.}}$, °C/год, α_a		Тренд $T_{\text{ммп}}$, °C/год, α_g		Коэффициент чувствительности, K_a	
	XX век	XXI век	XX век	XXI век	XX век	XXI век
R1, Надым	0,043	0,112	0,020	0,009	0,47	0,08
R3, Марре-Сале	0,036	0,152	0,035	0,096	0,97	0,63
R24, Болванский	-0,013	0,111	-0,006	0,049	0,46	0,44
R50А, Уренгой Южн.	0,050	0,110	0,047	0,045	0,94	0,41
R50В, Уренгой Сев.	0,055	0,142	0,044	0,067	0,80	0,47
Среднее значение	0,034	0,125	0,028	0,053	0,82	0,42

Процесс повышения среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород (ММП) идет синхронно, но с различными скоростями. В результате температурные различия между криогенными ландшафтами в области сплошного и прерывистого распространения мерзлоты сократились, а в области островного распространения практически отсутствуют (рис. 2).

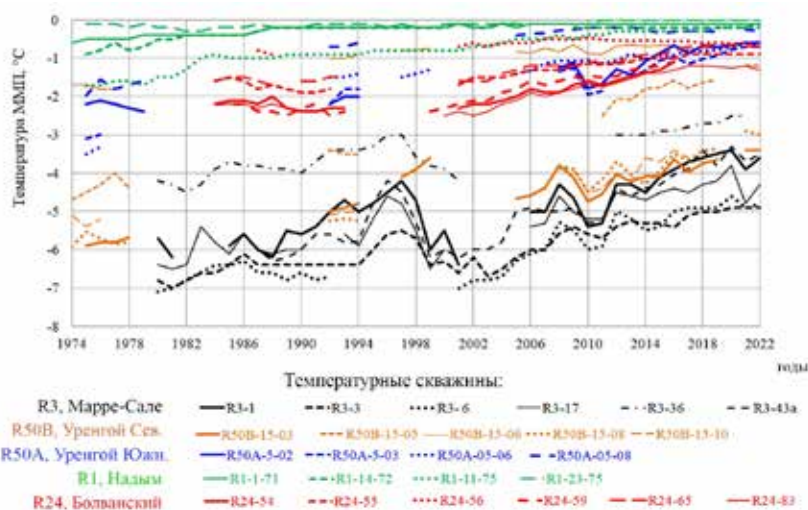


Рисунок 2. Изменение среднегодовой температуры ММП по данным геокриологических стационаров в западном секторе Российской Арктики.

При расчете трендов температуры многолетнемерзлых пород (α_g) в различных ландшафтных условиях использовались данные температурного режима во всех скважинах на геокриологических стационарах в западном секторе Российской Арктики. Затем определялось среднее значение α_g для двух временных периодов (таблица). Также был определен коэффициент чувствительности криолитозоны ($K\alpha$), который является надежным показателем современных мерзлотно-климатических изменений (Павлов, Малкова, 2009; Malkova et al., 2022). Коэффициент $K\alpha$ рассчитывался как соотношение между локальными трендами изменений температуры ММП и воздуха $K\alpha = \alpha_g / \alpha_a$.

Несмотря на существенное современное потепление климата, коэффициент чувствительности криолитозоны $K\alpha$ за период с 2000 по 2022 гг. оказывается в два раза меньше, чем $K\alpha$ для последних десятилетий XX века (табл. 1).

Уменьшение коэффициента чувствительности криолитозоны свидетельствует о возможности сохранения ее устойчивости при потеплении климата, что можно объяснить следующими причинами:

- Повышение температуры ММП замедлилось, т.к. при температуре выше $-1... -2$ °С в толще пород начинаются фазовые переходы в грунтах.
- Протаивание ММП увеличилось и достигло глубины, где в большинстве разрезов залегает более льдистый промежуточный слой. Оттаивание промежуточного слоя

требует значительно больших затрат тепла из-за высокой льдистости и препятствует повышению температуры нижележащих мерзлых толщ.

- При потеплении климата произошли видимые изменения растительности, а соответственно, усиление их теплоизолирующего эффекта. На западном Ямале высота мохового покрова возросла с 2 см (2001 г.) до 4,1 см (2021 г.). На тундровых водоразделах Уренгойского ГКМ наблюдается появление подроста деревьев, а на Европейском севере – изменение видового состава и разрастание кустарников.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 121041600042-7 и при поддержке РФФ, грант № 22-27-00181.

Литература

- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. – Москва, 2022. – 104 с.
- Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли. – 2009. – Т. XIII, № 4. – С. 32–39.
- Malkova, G.; Drozdov, D.; Vasiliev, A.; Gravis, A.; Kraev, G.; Korostelev, Y.; Nikitin, K.; Orekhov, P.; Ponomareva, O.; Romanovsky, V.; Sadurtdinov, M.; Shein, A.; Skvortsov, A.; Sudakova, M.; Tsarev, A. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic. *Energies* 2022, 15, 2311. <https://doi.org/10.3390/en15072311>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СНЕЖНОЙ ТОЛЩИ НА ПЛОЩАДКЕ МО МГУ ЗИМОЙ 2022/2023 ГГ.

Е.С. Николаева*, Д.М. Фролов, Ю.Г. Селиверстов, С.А. Сократов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

** nikolaeva_lizaveta@mail.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты полевых исследований, проведенных на метеоплощадке МГУ за зимний период 2022-2023 гг. Целью наблюдений являлось изучение развития снежной толщи и ее пространственной изменчивости за один зимний сезон. Полевые исследования заключались в анализе стратиграфических слоев снежной толщи и измерении их плотности. Полученные данные позволили охарактеризовать и оценить изменения снежных слоев, их структуру и плотность в пространственно-временном отношении. Результаты работы отображены на графиках пространственно-временной изменчивости снежного покрова за 2022-2023 гг., проанализирована эволюция снежной толщи за зимний период. Анализ наблюдений отражает действительно высокую пространственную и временную изменчивость снежного покрова зимой, что позволяет не только оценить и сравнить полученные данные с прошлыми исследованиями, но и дополнить и усовершенствовать уже имеющуюся информацию о неоднородности снежного покрова.

Ключевые слова: снежный покров, пространственно- временные неоднородности.

INVESTIGATION OF THE SPATIO-TEMPORAL HETEROGENEITY OF THE SNOW THICKNESS AT THE SITE OF THE LOMONOSOV MSU IN WINTER OF 2022/2023

E. S. Nikolaeva*, D. M. Frolov, Yu. G. Seliverstov, S. A. Sokratov

Lomonosov Moscow state university, Moscow, Russia

** a_nikolaeva_lizaveta@mail.ru*

Abstract. The paper presents the results of field studies conducted at the MSU meteorological site for the winter period 2022/2023. The purpose of the observations was to study the development of the snow column and its spatial variability in one winter season. Field research consisted in the analysis of stratigraphic layers of snow and measuring their density. The data obtained made it possible to characterize and evaluate changes in snow layers, their structure and density in spatiotemporal terms. The results of the work are displayed on the graphs of the spatial and temporal

variability of the snow cover for 2022/2023, the evolution of the snow column over the winter period is analyzed. The analysis of observations reflects a really high spatial and temporal variability of snow cover in winter, which allows not only to evaluate and compare the data obtained with past studies, but also to supplement and improve the already available information on the heterogeneity of snow cover.

Keywords: snow cover, spatial and temporal heterogeneities.

К настоящему времени моделировать пространственно-временные изменения снежного покрова для различных территорий становится возможным, основываясь на полученных ранее данных о физических и стратиграфических свойствах снежной толщи, а также опираясь на метеорологическую информацию по территории. Проводившиеся ранее исследования с использованием современного оборудования и технологий, которые позволили выявить закономерности пространственной изменчивости снежного покрова, дают возможность представлять неоднородность снежной толщи до времени и в пространстве с большой точностью и без необходимости полевых работ (Голубев и др., 2010; Комаров и др., 2018). Однако для проведения наиболее точной верификации результатов всё-таки требуется произведение натуральных наблюдений.

В работе представлены результаты полевых исследований, проведенных на метеоплощадке МГУ за зимний период 2022-2023 гг. Целью наблюдений являлось изучение развития снежной толщи и ее пространственной изменчивости за один зимний сезон. Полевые исследования заключались в анализе стратиграфических слоев снежной толщи и измерении их плотности.

Зима 2022-2023 гг. оказалась неоднородной по температурному режиму, при относительно близкой к норме среднемесячной температуре декабря. В январе и феврале наблюдалась в основном положительная аномалия температуры на большей части европейской территории страны. В среднем температурный режим декабря оказался близким к среднемноголетним значениям. По данным метеостанции ВДНХ в Москве, среднемесячная температура была 4,1 °С, что выше климатической нормы на 0,6 °С. Среднемесячная температура января по данным метеостанции ВДНХ в Москве составила –4,7 °С, что выше климатической нормы на 1,5 °С. Среднемесячная температура февраля в Москве составила –4,1 °С, что выше климатической нормы на 1,8 °С. Количество осадков примерно соответствовало среднемноголетним значениям для данного периода года, хотя в декабре их было примерно в два раза больше нормы, и составило 31,2 мм – в ноябре, 111,4 мм – в декабре, 28,9 – мм в январе и 33,8 мм – в феврале. Дату 15 ноября 2022 можно считать датой установления снежного покрова в Москве в зимний период 2022-2023 гг. Это, может быть, одна из самых ранних дат установления устойчивого снежного покрова в Москве с начала нового века. Дата самого раннего устойчивого снежного покрова, начиная с 2000 г. – 29 октября 2016 г. Далее следуют 14 ноября 2001 и 2007 гг. и 18 ноября 2004 г. Изменение

температуры воздуха, осадков и толщины снежно покрова за зимний период 2022-2023 гг. изображено на рис. 1.

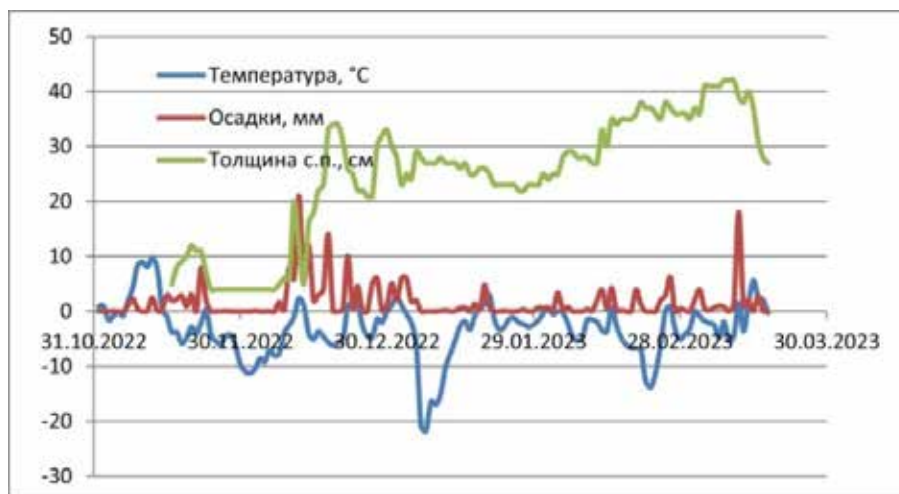


Рисунок 1. Изменение температуры воздуха, осадков и толщины снежно покрова по метеостанции ВДНХ за зимний период 2022-2023 гг.

В связи с обильными декабрьскими снегопадами толщина снежного покрова 22.12.2022 по рейке на метеоплощадке МГУ составила 31 см, что явилось своеобразным рекордом. Изучение стратиграфии снежной толщи на метеоплощадке МГУ зимой 2022-2023 гг. года проводилось 22 декабря, 12 и 17 января, 1 и 21 февраля и 2 и 14 марта. 17 января была также пройдена траншея. Стратиграфические колонки на 22 декабря и 21 февраля 2023 г. изображены на рисунке 2.

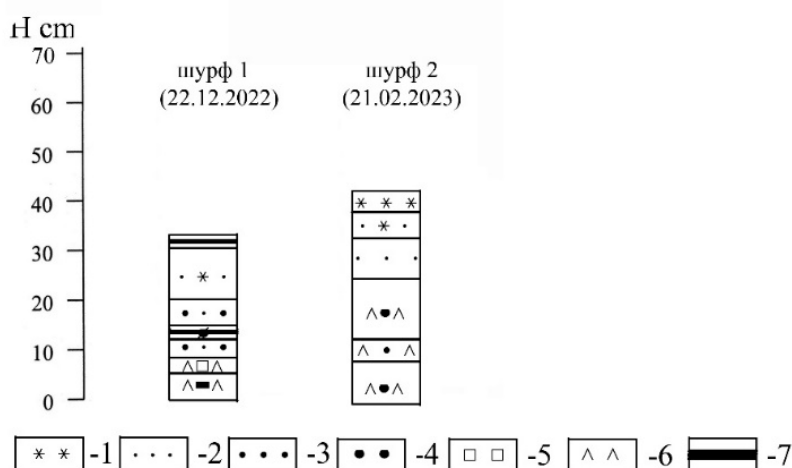


Рисунок 2. Наблюдаемые разрезы снежного покрова на метеоплощадке 22 декабря 2022 г. и 21 февраля 2023 г. Условные обозначения: 1 – свежавыпавший снег, 2 – мелкозернистый снег (0,1–0,5 мм), 3 – среднезернистый снег (0,5–1 мм), 4 – крупнозернистый снег (1–3,5 мм); 5 – оgranённые кристаллы; 6 – кристаллы глубинной изморози 7 – ледяная корка (по международной классификации Фриц, 2012).

Полученные данные позволили охарактеризовать и оценить изменения снежных слоев, их структуру и плотность в пространственно-временном отношении. Результаты работы отображены на графиках пространственно-временной изменчивости снежного покрова за 2022-2023 гг., проанализирована эволюция снежной толщи за зимний период. Анализ наблюдений отражает действительно высокую пространственную и временную изменчивость снежного покрова зимой, что позволяет не только оценить и сравнить полученные данные с прошлыми исследованиями, но и дополнить и усовершенствовать уже имеющуюся информацию о неоднородности снежного покрова.

Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0), «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4).

Литература

- Голубев, В. Н., Петрушина, М. Н., Фролов, Д. М. Закономерности формирования стратиграфии снежного покрова / В. Н. Голубев, М. Н. Петрушина, Д. М. Фролов // Лед и снег. – 2010. – № 1. – С. 58–72.
- Комаров, А. Ю. и др. Пространственно-временная неоднородность снежной толщи по данным пенетрометра SnowMicroPen / А. Ю. Комаров [и др.] // Лёд и Снег. – 2018. – Т. 58, №. 4. – С. 473–485.
- Фирц, Ш. и др. Международная классификация для сезонно выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова) / Ш. Фирц [и др.] – 2012.
- Фролов, Д. М. и др. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи на площадке МО МГУ зимой 2018/2019 гг / Д. М. Фролов [и др.] // Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2018 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М. В. Ломоносова. – 2019. – С. 225–230.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗМЫТИЯ БЕРЕГОВ СЕВЕРНЫХ РЕК В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

**П.П. Пермяков^{1,2,3*}, Г.Г. Попов¹, Т.А. Винокурова², А.Ф. Жирков²,
Г.С. Аммосов¹, Дж. С. Иванов¹**

1 – Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Россия
2 – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия
3 – Инженерно-технический институт СВФУ, г. Якутск, Россия
** permyakov2005@mail.ru*

Аннотация. При изменении климата наблюдается усиление процессов разрушения берегов северных рек. Исследователи выделяли основными причинами разрушения берегов воздействие таких процессов, как морозное растрескивание, эрозия, термическая денудация и др. Разрушение берегов происходит под влиянием двух факторов: действия волн и оттаивания мерзлоты. В работе представлена математическая модель тепловлагопереноса при размыве берегов с учетом инфильтрации атмосферных осадков, фильтрации надмерзлотных грунтовых вод и стока паводковых вод. Приведены результаты численного эксперимента при различных режимах сезонно-водного режима.

Ключевые слова: математическая модель, незамерзшая вода, фильтрация или миграция воды, морозное пучение, термопросадка.

FORECASTING THE EROSION OF THE BANKS OF NORTHERN RIVERS IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

P.P. Permyakov^{1,2,3*}, G.G. Popov¹, T.A. Vinokurova², A.F. Zhirkov²,
G.S. Ammosov¹, J.S. Ivanov¹

1 – Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia

2 – Institute of Permafrost Science SB RAS, Yakutsk, Russia

3 – NEFU Institute of Engineering and Technology, Yakutsk, Russia

* permyakov2005@mail.ru

Abstract. With climate change, there is an increase in the processes of destruction of the banks of the Northern Rivers. The researchers identified the main causes of coastal destruction as the effects of such processes as frosty cracking, erosion, thermal denudation, etc. The destruction of the banks occurs under the influence of two factors: the action of waves and thawing of permafrost. The paper presents a mathematical model of heat and moisture transfer during shore erosion, taking into account infiltration of atmospheric precipitation, filtration of permafrost groundwater and flood water runoff. The results of numerical experiment in various modes of seasonal water regime are given.

Keywords: mathematical model, non-frozen water, water filtration or migration, frost heaving, thermal deposition.

Введение. В настоящее время при изменении климата наблюдается усиление процессов разрушения берегов северных рек. Этой проблемой занимался целый ряд исследователей (*Дебольская, 2014; и др.*), которые выделяли основными причинами разрушения берегов воздействие таких процессов как абляция, морозное растрескивание, эрозия, термическая денудация и др. Особенно ярко это проявляется при наличии льдистых отложений.

Береговая часть грунта в предзимний период подвергается размыву за счет инфильтрации осенних атмосферных осадков и стока паводковых вод, миграции надмерзлотных грунтовых вод. Процесс миграции поровой воды происходит до полного промерзания сезонно-талого слоя. При промерзании водонасыщенные мерзлые породы представляют собой поликомпонентные многофазные системы, отличающиеся от немёрзлых пород своим составом (наличием льда) и строением (криогенной текстурой). Лед в мерзлых породах служит одновременно и породообразующим и вяжущим веществом минеральных частиц, увеличивающим прочность многолетнемерзлых пород. При резком и сильном понижении температуры водонасыщенные породы подвергаются морозному растрескиванию (*Гречищев, 1970*).

В весенний период при оттаивании трещиноватые грунты резко теряют свои прочностные свойства. Так, при оттаивании порового льда структурные льдоцементные связи разрушаются и начинается процесс размыва берегов рек. Разрушение берегов происходит под влиянием двух факторов: действия волн и оттаивания мерзлоты. В зависимости от геологического строения берега, эти процессы протекают по-разному (*Дебольская, 2014; и др.*). В данной работе представлена математическая модель тепловлагоденноса при размыве берегов с учетом инфильтрации атмосферных осадков, фильтрации надмерзлотных грунтовых вод и стока паводковых вод.

Постановка задачи. Математическая модель при профильной (в вертикальном разрезе) фильтрации в промерзающих – протаивающих мерзлых грунтах описывается следующей системой уравнений:

$$c_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) - (c_{\text{в}} V, \text{grad} T) + L \frac{\partial \theta_{\text{л}}}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_{\text{в}}}{\partial \tau} = \text{div}(k_{\text{ф}} \text{grad} H) - \frac{\partial W_{\text{л}}}{\partial \tau}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial W_{\text{в}}}{\partial \tau} \text{div}(k \text{grad} W_{\text{в}}) - \frac{\partial W_{\text{л}}}{\partial \tau}. \quad (3)$$

Система уравнений (1)–(3) замыкается уравнением количества незамерзшей воды $W_{\text{не}} = W_{\text{не}}(T, W)$. На поверхности грунта задано условие инфильтрации снеговой воды или испарения. На левой границе области может задаваться как условие напора надмерзлотных грунтовых вод, так и напора сезонной динамики речной воды. Численное решение нелинейных задач осуществляется методом прогонки с использованием итераций.

Прогноз температурного режима при размыве грунта. Вычислительный эксперимент по тепло- и влагопереносу в грунтовом основании проведен в Центральной Якутии. Динамика подъема паводковой воды задана по многогодичном гидрографическим стокам реки Лены. Данный участок имеет сплошную мерзлоту, в таких районах за фронтом деятельного слоя находится зона повышенной суммарной влажности. По расчетам получается, что на глубине 2,5–3,5 м имеется зона повышенной влажности свыше 27 %. Возле реки мощность мерзлого слоя увеличивается и доходит до 2 м (площадь $\approx 2 \cdot 10 \text{ м}^2$).

Вывод формулы для расчета величины пучения основан на предположении, что расширение объема грунта происходит по высоте (Цытович, 1979). Данная формула имеет вид: $\Delta h = \int_0^l (\theta - n)_+ dx$, где θ – переменная функция (объемная влажность), которая определяется из решения системы уравнений тепловлагопереноса, т.е. учитывается процесс миграции влаги (фильтрации под напором) (Zhang et al., 2018; и др.).

Стабилизированные осадки слоя оттаивающего грунта можно определить по следующей формуле: $s = s_{th} + s_c$ (СНУП 2.02.04-88).

Растрескивание (образование трещины) возможно, если $\sigma_{\infty}^p < \sigma(T, W)$, где σ , σ_{∞}^p – полное напряжение и предел длительной прочности (Гречищев, 1970).



а б
Рисунок 1. Растрескивание (а) и размыв (б) берегов рек.

Выводы. Проведенные численные эксперименты показали, что в осенний период грунтовая (надмерзлотная, дождевая и паводковая) вода стремится в сторону реки. При понижении температуры верхняя граница грунта промерзает, а грунтовая (незамерзшая) вода начинает мигрировать до полного промерзания. В процессе промерзания, т.е. при понижении температуры воды, происходит пучение и растрескивание грунта (рис. 1). А в весенний период прибрежный участок при повышении температуры мерзлого грунта резко теряет прочностные характеристики, начинается процесс эрозии, которая сопровождается просадкой, термообразией и размывом.

Литература

- Гречищев С.Е. К основам методики прогноза температурных напряжений и деформаций в мерзлых грунтах. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1970. – 53 с.
- Дебольская Е.И. Математическая модель русловых деформаций рек криолитозоны // Водные ресурсы. – 2014. – Т. 41, № 5. – С. 496–506.
- Пермяков П.П. Численное моделирование задач конвективно-диффузионного переноса при фазовом переходе // По проблемам прочности материалов и конструкции для регионов холодного климата: тр. I Евразийского симпозиума, 16–20 июля 2002 г. – Якутск, 2002. – Ч. IV. – С. 149–156.
- СНиП 2.02.04-88. Основания фундаменты на вечномерзлых грунтах. Госстрой СССР. – М.: АПП ЦИПП, 1991. – 100 с.
- Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1979. – 215 с.
- Zhang X., Zhang M., Pei W., Lu J. Experimental study of hydro-thermal characteristics and frost heave behavior of a saturated silt within a closed freezing system. Applied Thermal Engineering. Vol.129. – 2018. – Pp. 1447–1454.

ФЕНОМЕНАЛЬНАЯ ПОЖАРНАЯ АКТИВНОСТЬ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ИЮНЕ 2021 Г.

М.И. Петров*

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

** pitrofv@yandex.ru*

Аннотация. В 2021 г. в Центральной Якутии наблюдалась рекордная пожарная активность. В улусах с наибольшей пожарной активностью в июне температура воздуха была рекорды за всю историю наблюдений. При этом почти во всех этих улусах не было заметных дождей до конца июня. В условиях сухой и жаркой погоды под пологом лесов накопилось много горючего материала, что послужило причиной возникновения

большой части пожаров в третьей декаде месяца. Однако в Вилюйске в середине месяца в течение 5 дней безостановочно шел дождь, выпало 15,4 мм осадков и в итоге там лесные пожары охватили очень небольшую площадь по сравнению с соседними улусами. Таким образом, в распространении лесных пожаров определяющую роль играют дожди, причем не только количество, но и распределение в течение месяца.

Ключевые слова: пожарная активность, метеорологические условия, Центральная Якутия.

PHENOMENAL FIRE ACTIVITY IN THE CENTRAL PART OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA) AND METEOROLOGICAL CONDITIONS IN JUNE 2021

M.I. Petrov*

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

**pitrofv@yandex.ru*

Abstract. In 2021, record fire activity was observed in Central Yakutia. In the uluses with the highest fire activity in June, the air temperature beat records in the entire history of observations. At the same time, almost in all these uluses there was no noticeable rain until the end of June. In conditions of dry and hot weather, a lot of combustible material accumulated under the forest canopy, which caused most of the fires in the third decade of the month. However, in Vilyuisk in the middle of the month, 15.4 mm of rain fell non-stop for 5 days, and as a result, forest fires there covered a very small area compared to neighboring uluses. Thus, in the spread of forest fires, rains play a decisive role, not only in quantity, but also in distribution during the month.

Keywords: fire activity, meteorological conditions, Central Yakutia.

В 2020 г. лесные пожары в Центральной Якутии охватили территорию площадью более чем 1,7 млн га, а в 2021 г. – 2,8 млн га (рис. 1). Это является наибольшей величиной за всю историю наблюдений за пожарной активностью в Центральной Якутии (https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml).



Рисунок 1. Динамика лесных пожаров в Центральной Якутии (2000–2021 гг.).

В 2021 г. в июне в рассмотренных улусах лесные пожары охватили территории площадью более 10 000 га. Почти во всех этих улусах центральной части нашей республики в 2021 г. среднемесячная температура воздуха июня была рекорды за всю историю наблюдений (www.pogodaiklimat.ru).

Метеорологические условия и активность лесных пожаров в центральной части Республики Саха (Якутия) в июне 2021 г.

Улусы (метеостанции)	Метеоусловия и активность лесных пожаров							
	Ср. мес. темп.	Норма	Откл.	Сум. мес. осадков	Норма	Откл.	Кол. пожаров	Площадь пожаров
	град. С	град. С	град. С	мм	мм	мм		га
Нюрба	18,9	14,7	4,2 – рекорд	20	40	-20	29 (23 после 20.06)	44560
Сунтар	19,8	16,1	3,7 – рекорд	29 (20 – 28 июн)	42	-13	25 (20 после 16.06)	49949
Верхне-Виллойск	19	14,7	4,3 – рекорд	12	33	-21	31 (21 после 20.06)	16984
Виллойск	19,8	16,3	3,5 – рекорд	40 (15,4 – 07–12 июн; 20–26 июн.)	35	5	14 (11 после 20.06)	2708
Якутск	20,3	17	3,3 – рекорд	2 (рекорд 1 – 1888)	30	-28	8 (6 после 25.06)	424
Покровск	18,3	15,1	3,2	10	33	-23	22 (18 после 20.06)	10355
Бердигестях	17,9	14,2	3,7 (рекорд 3,8 – 1998 г.)	13	31	-18	31 (30 после 20.06)	30367
Ытык-Кюель	18,6	15,1	3,5 – рекорд	8	27	-19	4 (4 – после 19.06)	8812
Томпо	16,3	13,8	2,5	10 (рекорд 9 – 2017)	47	-37	56 (49 после 20.06)	123330

Например, в Сунтаре она принимала значение 19,8 °С при многолетней норме среднемесячной температуры воздуха июня в данном улусе – 16,1 °С. Отклонение составило рекордные 3,7 °С (таблица).

В улусах с высокой пожарной активностью в этом месяце наблюдался дефицит осадков. Например, в Сунтаре в июне выпало 29 мм осадков при норме 42. Причем, из этих 29 мм 20 мм выпало в конце месяца – 28 июня. В г. Якутске выпало всего 2 мм при рекорде 1888 г. – 1 мм. В Томпо, с максимальной из рассматриваемых улусов площадью пожаров – 123 330 га, в июне выпало 10 мм при многолетней норме – 47 мм. Меньше, 9 мм, в этом месяце выпадало только в 2017 г. В Виллойске, с наименьшей пожарной активностью, если не принимать в расчет территорию ГО г. Якутск, где в основном горела свалка, температура июня тоже была рекордной и составила 19,8 °С при норме 16,3 °С. Однако осадков выпало 40 мм, что на 5 мм больше многолетней нормы. Причем с 07 по 12 июня выпало 15,4 мм. Из этого можно сделать вывод об определяющей роли количества осадков в распространении лесных пожаров, не только количества, но и распределения заметного количества осадков в

течение месяца. Например, и в Вилюйске, и в Сунтаре в конце месяца выпало заметное количество осадков – 20 мм. Однако в Сунтаре, с высокой пожарной активностью, до этого заметного количества осадков не было.

Пожары во всех улусах в основном начались в третьей декаде месяца, в чем проявляется эффект накопления в условиях сухой и жаркой погоды горючего материала под пологом лесов, что создает высокую пожарную опасность.

Литература

https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml.
www.pogodaiklimat.ru.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ОПЫТНОЙ ПЛОЩАДКЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА СВФУ

А. Н. Петрова*, И. И. Ноев, Д. В. Филиппов

1 – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

2 – Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия

**al9@mail.ru*

Аннотация. Статья посвящена проекту «Дом под куполом» на площадке Испытательного полигона СВФУ. Обозначена уникальность и важность полигона как универсального испытательного центра для проведения метеорологического мониторинга в течение года. В эксперименте используются две установки автоматического мониторинга «САМ-ММ», разработанные в лаборатории геоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН (г. Томск). По результатам мониторинга метеорологических параметров на площадке «Дом под куполом» выявлена значительная разность температуры воздуха внутри купола в сравнении с наружным воздухом от типа атмосферной циркуляции, что объясняется главным образом приходом суммарной солнечной радиации и разностью альbedo подстилающей поверхности.

Ключевые слова: испытательный полигон, Дом под куполом, климат, метеорологический мониторинг, метеостанция.

METEOROLOGICAL OBSERVATIONS AT THE EXPERIMENTAL SITE OF THE NEFU PROVING GROUND

A. N. Petrova*, I. I. Noev, D. V. Filippov

1 – Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

2 – North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

** al9@mail.ru*

Abstract. The article is devoted to the project «House under the Dome» at the site of the NEFU proving ground. The uniqueness and importance of the landfill as a universal testing center for meteorological monitoring during the year is indicated. The experiment uses two automatic monitoring units "SAM-MM", developed in the laboratory of Geoinformation Technologies of the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems (IMKES) SB RAS (Tomsk). According to the results of monitoring of meteorological parameters at the Dom under the Dome site, a significant difference in the temperature of the air inside the dome in comparison with the outside air from the type of atmospheric circulation was revealed, which is mainly due to the arrival of total solar radiation and the difference in the albedo of the underlying surface.

Keywords: proving ground, domed house, climate, meteorological monitoring, weather station.

Проект «Дом под куполом» – проведение научно-исследовательских работ по созданию микроимитационной модели жилого дома под куполом для оценки влияния купольных технологий на состояние вечно мерзлых грунтов, тепло- и энергоэффективности жилых зданий и для изучения надежности купольных конструкций, комфортности проживания, здоровья и психофизического состояния людей.

Цель метеорологического наблюдения – отслеживание метеорологических параметров в течение разных сезонов года и проведение исследования влияния купола на температурный режим в сравнении с температурой наружного воздуха.

В рамках исследования были поставлены следующие задачи:

1. Развернуть стационарные метеорологические наблюдения в двух точках: станция № 1 на открытом воздухе (контрольная точка), станция № 2 внутри купола;
2. Сформировать базу метеорологических данных;
3. Определить среднюю и максимальную разность наблюдаемых метеорологических параметров внутри купола и в контрольной точке.

В исследованиях использовались две установки автоматического мониторинга «САМ-ММ», предназначенных для удаленной автономной регистрации и сбора метеорологических данных. Программное обеспечение удаленного сервера хранения данных и клиентского приложения позволяет конфигурировать контроллер, считывать данные с контроллера и с сервера данных, визуально представлять и экспортировать данные в текстовом формате «.csv».

Комплекс, установленный внутри купола, имеет датчики температуры и влажности воздуха, температуры подстилающей поверхности, давления и солнечной радиации. Наружный комплекс оснащен датчиками температуры и влажности воздуха, температуры подстилающей поверхности, давления, солнечной радиации, температуры снежного покрова, скорости и направления ветра.

Метеорологическая установка была развернута на опытной площадке, максимально подходящей в условиях эксперимента с точки зрения обеспечения репрезентативности данных и сохранности оборудования. САМ-ММ №60000039 установлен внутри купола, в 2 м от юго-западной стены дома. САМ-ММ №60000025 (для мониторинга фоновых показателей) установлен в южной части двора, в 10 м к юго-западу от купола. Высота купола – 15 м. Забор высотой 2 м проходит в 10,5 м к югу и 10 м к западу.

Статистический анализ метеорологических рядов показал значительное тепляющее влияние купола на температуру воздуха. Предположительно, это обусловлено несколькими факторами, в первую очередь, приходом суммарной солнечной радиации, т.к. наибольшие значения разности фиксируются в дневное время с 12 до 16 ч. зимой и с 12 до 19 ч. – летом.

Немаловажное значение имеет тот факт, что подстилающая поверхность под куполом не была покрыта снегом, т.е. имеется значительная разность значений альбедо. В среднем альбедо снежного покрова 70–80 %, а сухой глинистой почвы – 30 %.

Как следствие, над разными поверхностями при одинаковой сумме солнечной радиации формируется разная величина эффективного излучения. Разница в температуре между двумя станциями в январе-феврале составила в среднем за сутки 7,1–7,7 °С. Абсолютный минимум за период наблюдений составил –50,2 °С в 8 ч. 26 января, в этот час внутри купола зафиксирована температура –41,4 °С. Таким образом, в самый морозный день купол обеспечил разницу по сравнению с наружным воздухом в 10 °С. При этом корреляционная связь между двумя рядами температуры ожидаемо высокая (коэффициент 0,97). На основе исходной ежечасной информации были построены графики, рассчитаны осредненные по декадам значения, выбраны максимальные и минимальные значения температуры воздуха снаружи и внутри купола.

По результатам анализа метеорологических параметров выявлены значительные разности температуры воздуха, обусловленные различными факторами, главными из которых являются приход солнечной радиации в ясную погоду, разность альбедо подстилающей поверхности, и, вероятно, поток тепла от стены дома. Для определения степени влияния всех факторов требуется дальнейшее исследование и продолжение мониторинга метеорологических параметров в разные сезоны и при разных синоптических условиях, в течение нескольких лет.

Литература

- Климат Якутска / под ред. : Ц. А. Швер, С. А. Изюменко. – Л. : Гидрометеиздат, 1982. – 246 с.
- Отчет о научно-исследовательской работе «Купольные технологии при их эксплуатации в условиях криолитозоны и экстремально низких температур» : рукопись. – Якутск, 2021. – 91 с.
- Петрова, А. Н. О промежуточных результатах мониторинга метеорологических параметров в районе проекта «Дом под куполом» / А. Н. Петрова // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия: Науки о земле. – 2020. – № 3 (19). – С. 45–52.
- ФГБУ «Якутское УГМС» [электронный ресурс]: официальный сайт [сайт]– URL: <http://ugms14.ru/>. – Дата обращения 06.04.2023.

ИЗМЕНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОГО ПЕРИОДА В ЗАПАДНЫХ РАЙОНАХ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

А.Н. Петрова*

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

* aleksandrap@mpi.ysn.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты анализа динамики метеорологических параметров теплого периода по станциям западных районов Якутии за два периода – 1961-1990 гг. и 1991-2022 гг. Выявлены выраженные изменения продолжительности теплого периода, сумм положительных среднесуточных температур и осадков, гидротермического коэффициента Селянинова.

Ключевые слова: температура, осадки, теплый период, ГТК Селянинова.

CHANGES IN SOME METEOROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE WARM PERIOD IN THE WESTERN AREAS OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

A.N. Petrova*

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian

* aleksandrap@mpi.ysn.ru

Abstract. The article presents the results of the analysis of the dynamics of meteorological parameters of the warm period at the stations of the western regions of Yakutia for two periods - 1961-1990 and 1991-2022. Pronounced changes in the duration of the warm period, the sum of average daily temperatures and precipitation, as well as the coefficient humidification.

Keywords: temperature, precipitation, the warm period, coefficient humidification.

По данным ВМО, средние темпы повышения приземного воздуха в глобальном масштабе за период 1976-2020 гг. составили 0,18 °C/10 лет (Третий ..., 2022). Скорость роста средней по России среднегодовой температуры составила +0,49 °C/10 лет, при этом отмечается, что наиболее быстрый рост температуры (0,64 °C/10 лет) наблюдается весной (Доклад..., 2023). Повышение температуры потенциально способствует росту содержания водяного пара в атмосфере, что, в свою очередь, приводит к росту осадков, в особенности – экстремальных осадков. При этом отмечается перераспределение вклада дождевой облачности разных типов, проявляющееся в росте доли кучево-дождевых облаков и уменьшении вклада слоисто-дождевой облачности. Вследствие этого увеличивается количество ливневых осадков за счет уменьшения доли обложных осадков (Третий..., 2022). Изменение температуры воздуха, количества и характера выпадения атмосферных осадков оказывает влияние на состояние сезонно-талого слоя многолетней мерзлоты. Для выявления изменений параметров теплого периода на территории западных районов Якутии были проанализированы метеорологические ряды суточного разрешения по метеостанциям Саскылах, Оленек, Сухана, Шелагонцы, Чумпурук, Мирный, Сунтар, Ленск, Витим (*Спец. массивы ВНИИГМИ-МЦД, 2023*).

Метеорологические ряды суточного разрешения были разбиты на два периода: 1961–1990 гг. и 1991–2022 гг. (далее первый период и второй период). Для этих периодов определены даты наступления и окончания теплого периода, его продолжительность, рассчитаны суммы положительных температур, суммы температур выше +10 °C (период

активной вегетации), суммы осадков за период со среднесуточной температурой выше 0 °С и выше 10 °С и рассчитан гидротермический коэффициент Селянинова. За теплый период принимается отрезок времени со среднесуточной температурой выше 0 °С (*Кобышева и др., 2001*).

Начало теплого периода в западных районах Якутии варьируется от конца апреля на юге (Витим, Ленск) до начала июня (Саскылах). В последние десятилетия происходит смещение сроков начала и окончания теплого периода (табл. 1). На большинстве рассмотренных станций произошло увеличение продолжительности теплого периода за счет более раннего перехода через 0°С в сторону повышения. Смещение дат во втором периоде по сравнению с первой весной составило от 6 и более суток. Осенью на большинстве станций отмечается более позднее наступление отрицательных температур на 1-2 суток. Незначительные изменения продолжительности теплого периода произошли на станциях Оленек, Сухана и Чумпурук. Единственная станция из рассмотренных, где произошло сокращение теплого периода – Мирный. Предположительно, это могло произойти в результате нарушения однородности ряда – метеоплощадка станции была перенесена в 1989 году на 600 м к ВСВ, параллельные наблюдения не проводились. Наибольшие изменения произошли на самой южной станции Витим, где продолжительность теплого периода увеличилась на 18 суток.

Таблица 1

Даты начала и окончания, продолжительность в сутках периода с температурой выше 0 °С

Станции	Дата начала		Дата окончания		Продолжительность	
	1961–1990	1991–2022	1961–1990	1991–2022	1961–1990	1991–2022
Саскылах	5 июня	30 мая	20 сент.	22 сент	108	116
Оленек	23 мая	20 мая	23 сент	24 сент.	124	128
Сухана	16 мая	16 мая	23 сент.	24 сент.	131	132
Шелагонцы	16 мая	8 мая	24 сент	23 сент.	132	139
Чумпурук	7 мая	4 мая	29 сент.	27 сент.	146	147
Мирный	2 мая	4 мая	30 сент.	29 сент.	152	149
Сунтар	30 апреля	23 апреля	2 окт.	3 окт.	156	164
Ленск	29 апреля	23 апреля	2 окт.	4 окт.	157	165
Витим	30 апреля	20 апреля	3 окт.	11 окт.	157	175

На всех станциях во втором периоде по сравнению с первым отмечено увеличение суммы среднесуточных температур за теплый период (табл. 2). Еще более заметно увеличились суммы температур выше +10°С (период активной вегетации растений), при этом разность между двумя периодами возрастает при продвижении к северу. На станции Саскылах это показатель вырос в 1,8 раза. Увеличение теплообеспеченности вегетационного

периода создает условия для смены типов растительности, что находит подтверждение в работах других авторов. Калиничевой и др. по анализу топографических карт 1950 и 1973 гг. и современных спутниковых снимков Landsat-8/OLI выявлены ареалы зарастания тундры в районе Саскылаха лесной растительностью (Калиничева и др., 2021). Суммы атмосферных осадков теплого периода увеличились на всех станциях, кроме Саскылаха, где произошло уменьшение их количества. Гидротермический коэффициент Селянинова колеблется от 0,9 до 1,2 (засушливая и слабозасушливая зоны). Значительное уменьшение ГТК произошло в Саскылахе (от 0,8 в первом периоде до 0,6 во втором периоде).

Таблица 2

Суммы температур и суммы осадков за теплый период

Станции	Σt выше 0°			Σ осадков за период с t выше 0°			ГТК	
	1961-1990	1991-2022	Разность, °С	1961-1990	1991-2022	Относит. разность, %	1961-1990	1991-2022
Саскылах	795,9	932,1	136,2	106,9	81,3	76,0	0,8	0,6
Оленек	1159,3	1320,6	161,3	158,7	174,9	110,2	1,2	1,1
Сухана	1203,4	1360,1	156,7	135,7	167,2	123,3	0,9	1,0
Шелагонцы	1222,8	1370,0	147,2	187,3	192,2	102,6	1,3	1,2
Чумпурук	1517,2	1653,2	136,0	162,5	163,6	100,7	0,9	0,9
Мирный	1627,1	1737,3	110,2	176,5	200,8	113,7	0,9	1,0
Сунтар	1763,1	1935,4	172,3	179,2	203,6	113,6	0,9	0,9
Ленск	1753,0	1872,7	119,7	215,0	272,6	126,8	1,1	1,2
Витим	1788,2	1982,9	194,7	251,9	285,0	113,1	1,2	1,1

Анализ метеорологических параметров показал, что на территории западных районов Якутии произошли существенные изменения термического режима и увлажненности теплого периода, наиболее выраженные на самой северной (Саскылах) и самой южной (Витим) станциях из рассмотренных. Неоднородный характер изменений объясняется разницей в высоте, особенностями рельефа и локального климата отдельных станций.

Литература

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. – Москва: Росгидромет. – 2022. – 104 с.

Исследование наступления леса на тундру в регионе Восточной Сибири в условиях меняющегося климата с применением ГИС и данных дистанционного зондирования Земли / Калиничева С.В., Никифорова Н.Н., Максимов Н.А., Мисайлов И.Е., Федоров А.Н. // Вестник СВФУ. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 73–82.

Климат России / Н. В. Кобышева, Е. М. Аксентьева., Э. Г. Богданова [и др.]. – Санкт-Петербург: Гидрометеоздат. 2001. – 654 с.

Специализированные массивы данных для климатических исследований ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>. – Дата обращения: 15. 01. 2023.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – Санкт-Петербург: Научно-технологические. – 2022. – 124 с.

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА МЕРЗЛОТНО-КЛИМАТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ МАРЕВЫХ ЛАНДШАФТОВ АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ

*V.V. Samsonova**

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

**vsamsonova@mail.ru*

Аннотация. Мари, распространенные в межгорных впадинах и равнинах в пределах Амурской области, считаются индикаторами наличия вечной мерзлоты в этом регионе. В связи с этим было проведено ретроспективное и прогностическое моделирование динамики вечной мерзлоты и климата для торфяников. Результаты расчетов позволили оценить реакцию литогенной основы ландшафтов торфяников на изменения климатических условий. Выявлено, что тепловое состояние торфяных болот в межгорных котловинах можно считать относительно стабильным. На равнинах северной части Амурской области деградация вечной мерзлоты на торфяниках началась еще до периода современного потепления климата.

Ключевые слова: мари, торфяники, климатические условия, мерзлота.

FORECAST ASSESSMENT OF THE CLIMATIC DYNAMICS OF PERMAFROST OF THE AMUR REGION PEATLANDS

*V.V. Samsonova**

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

**vsamsonova@mail.ru*

Absrakt. Mari, common in intermountain depressions and plains within the Amur region, are considered to be indicators of the presence of permafrost in this region. In this regard, retrospective and predictive modeling of permafrost-climatic dynamics for peatlands was performed. The results of the calculations allowed us to evaluate the reaction of the lithogenic basis of peatlands landscapes to changes in climatic conditions. It is revealed that the thermal state of peat bogs in intermountain basins can be considered relatively stable. On the plains of the northern part of the Amur region, the degradation of permafrost on peatlands began even before the period of modern climate warming.

Keywords: marie, peatlands, climatic conditions, permafrost.

Связь болот Амурской области с мерзлотой установлена в начале XX века (*Левицкий, 1910*). Термин «марь» использовали, характеризуя участки наблюдений (*Сумгин, 1937*), приуроченность мерзлоты к марям в северной и средней части Амурского бассейна (*Лукашев, 1938*), связь типов мерзлоты с типами марей (*Кудрявцев, 1939*), а также глубиной залегания вечной мерзлоты (*Кушев, 1939*), прямо указывая на то, что наличие вечной мерзлоты является основным признаком марей, отличающим их от болот (*Яновский, 1951*). В результате сформировалось представление о том, что «марь» – природный комплекс избыточно переувлажненных территорий таежной зоны, подстилаемый на небольшой глубине многолетнемерзлыми породами (ММП). В то же время фактические данные, свидетельствовавшие о динамике мерзлотных условий этого региона криолитозоны, позволили сделать вывод о деградации вечной мерзлоты (*Сумгин, 1937; Кудрявцев, 1939*).

Перспективами нового строительства, реконструкции и расширения имеющихся на юге Дальнего Востока инфраструктурных объектов, обусловлена актуальность проблемы и необходимость оценки устойчивости маревых ландшафтов и ММП к потеплению климата.

Моделирование мерзлотно-климатической динамики выполнено в программной среде WARM (*Хрусталева и др., 1994*). В качестве опорной для маревых ландшафтов в пределах равнин использована метеостанция Бомнак, межгорных котловин – Усть-Нюкжа (табл. 1-2).

Выбор типа разреза литогенной основы (табл. 3) обусловлен тем, что 77 % заболоченной территории Амурской области в середине XX века приходилось на сфагновые мари, т.е. торфяники. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что в межгорных котловинах многолетнемерзлое состояние торфяников сохранялось в XX веке и при повышении температуры ММП в спектре отрицательных значений будет сохраняться до конца текущего столетия. Маревые мерзлотные ландшафты межгорных котловин в северной части Амурской области можно считать относительно устойчивыми к современному потеплению климата (табл. 4).

Таблица 1

Среднемесячная температура воздуха, °С (Научно-прикладной справочник, 1992)

Вариант модели	Период	Месяц											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
метеостанция Бомнак													
1. BOR4PO80	до 1980	-32,2	-24,8	-13,1	-1,6	7,9	14,7	17,8	15,3	8,5	-2,8	-20,0	-30,7
2. BOR4PROG	1980-2080*												
метеостанция Усть-Нюкжа													
3. UNR4PO80	до 1980	-32,3	-26,4	-15,2	-3,1	6,5	14,3	17,6	14,3	6,8	-4,9	-21,2	-31,1
4. UNR4PROG	1980-2080**												

* трендом = 0,032 °С/год; ** трендом = 0,031 °С/год.

Таблица 2

Снежный покров (Научно-прикладной справочник, 1992)

Характеристика	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
метеостанция Бомнак												
Высота, м	0,32	0,34	0,36	0,27	0	0	0	0	0	0,04	0,21	0,29
Плотность, г/см ³	0,16	0,17	0,17	0,21	0	0	0	0	0	0,13	0,14	0,16
метеостанция Усть-Нюкжа												
Высота, м	0,20	0,21	0,23	0,09	0	0	0	0	0	0,02	0,10	0,15
Плотность, г/см ³	0,13	0,14	0,15	0,13	0	0	0	0	0	0,11	0,11	0,13

Таблица 3

Характеристики грунтов разреза

Глубина, м	Состав грунтов разреза	Теплопроводность талой фазы	Теплопроводность мерзлой фазы	Объемная теплоемкость талой фазы	Объемная теплоемкость мерзлой фазы	Объемная теплота фазовых переходов	Температура фазового перехода
		Вт(м·°С)	Вт(м·°С)	Вт·ч(м ³ ·°С)	Вт·ч(м ³ ·°С)	Вт·ч/м ³	
0 – 1,1	Торф	0,5	1,30	972	583	52080	-0,2
1,1-3,5	Суглинок	0,8	1,50	555	690	21500	-0,2
3,5-15,0	ГЩМ*	2,25	2,90	790	635	10430	-0,15

*Глыбово-щебнистый материал с супесчаным наполнителем (60 % – крупнообломочные включения, 40 % – супесчаный наполнитель).

Таблица 4

**Расчетная средняя годовая температура грунтов по данным метеостанции Усть-Нюкжа
(задачи UNR4PO80, UNR4PROG), °С**

Глубина, м	1910	1917	1980	2010	2020	2024	2040	2060	2080
1	-2,49	-2,56	-2,69	-1,69	-1,47	-1,37	-0,87	-0,23	-0,08
2	-2,23	-2,32	-2,51	-1,67	-1,42	-1,31	-0,85	-0,32	-0,21
3	-2,1	-2,21	-2,44	-1,68	-1,42	-1,31	-0,89	-0,37	-0,23
5	-1,96	-2,09	-2,37	-1,69	-1,44	-1,34	-0,92	-0,42	-0,26
7	-1,84	-2	-2,32	-1,69	-1,45	-1,35	-0,94	-0,45	-0,29
10	-1,68	-1,86	-2,24	-1,7	-1,46	-1,37	-0,98	-0,51	-0,33
12	-1,57	-1,77	-2,11	-1,69	-1,47	-1,38	-1,00	-0,54	-0,35
15	-1,41	-1,64	-2,12	-1,69	-1,48	-1,39	-1,03	-0,59	-0,39

Ретроспективное моделирование показало, что на равнинах в северной части Амурской области деградация вечной мерзлоты на марях началась еще до периода современного потепления климата (табл. 5). Из-за опускания кровли вечной мерзлоты такие участки, по существу, утратили статус марей и в настоящее время представляют собой болота, сохраняя значение индикатора несливающихся вечномерзлых толщ. К концу текущего столетия на равнинах произойдет полная деградация ММП в пределах торфяников, поэтому такие мерзлотные ландшафты не устойчивы к потеплению климата.

Таблица 5

**Расчетная средняя годовая температура грунтов по данным метеостанции Бомнак
(задачи BOR4PO80, BOR4PROG), °С**

Год	Глубина, м									
	1	2	3	5	7	10	12	15	20	30
1910	0,504	-0,048	-0,204	-0,211	-0,216	-0,223	-0,227	-0,233	-0,24	-0,24
1980	1,253	1,052	0,836	0,608	0,447	0,208	0,051	-0,15	-0,16	-0,16
2020	2,37	2,03	1,73	1,41	1,19	0,88	0,68	0,38	-0,15	-0,16
2024	2,48	2,14	1,83	1,50	1,28	0,97	0,76	0,46	-0,15	-0,16
2080	3,95	3,52	3,13	2,71	2,43	2,01	1,74	1,33	0,63	-0,15

Литература

- Кудрявцев, В. А. Динамика вечной мерзлоты в бассейне среднего течения р. Селемджи и связанные с ней условия строительства в этом районе / В. А. Кудрявцев // Труды Комитета по вечной мерзлоте. – Том VIII. – 1939. – С. 81–117.
- Кушев, С. Л. Морфология и генезис бугристых марей / С. Л. Кушев // Труды Комитета по вечной мерзлоте. – Том VIII. – 1939. – С. 120–160.
- Левицкий, А. П. К вопросу об эволюции болотных формаций Амурской области / А. П. Левицкий // Почвоведение. – 2010. – №1. – С. 82–90.
- Лукашев, К. И. Область вечной мерзлоты как особая физико-географическая и строительная область / К. И. Лукашев. – Л., 1938. – 186 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Выпуск 25. Хабаровский край, Амурская область. – СПб: Гидрометеиздат, 1992. – 558 с.
- Сумгин, М. И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР / М. И. Сумгин. – М.–Л.: Изд-во АН СССР. – 379 с.
- Хрусталева, Л. Н., Емельянов, Н. В., Пустовойт, Г. П., Яковлев, С. В. Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM // Свидетельство № 940281. – РосАПО, 1994.

НОВАЯ ЛОКАЛЬНАЯ ЛИНИЯ МЕТЕОРНЫХ ВОД ЯКУТСКА

Н.В. Торговкин^{1*}, Д.Е. Сивцев², Н.И. Лыхота¹, В.В. Спектор¹

1 – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

2 – Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

** nicktorg@yandex.ru*

Аннотация. На основе 5-летних данных построена новая локальная линия метеорных вод по соотношению стабильных изотопов кислорода и водорода в Якутске. Эта линия позволяет увидеть межгодовую изменчивость климатических условий для Центральной Якутии. Проведено сравнение с изотопным составом подземных льдов Центральной Якутии и Северо-Востока Сибири.

Ключевые слова: стабильные изотопы кислорода и водорода, избыток d, локальная метеоритная водная линия, осадки, ледяные клинья.

NEW LOCAL METEORIC WATER LINE OF YAKUTSK

N.V. Torgovkin^{1*}, D.E. Sivtsev², N.I. Lykhota¹, V.V. Spektor¹

1 – Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

2 – Faculty of Geography Lomonosov MSU, Moscow, Russia

**e-mail докладчика nicktorg@yandex.ru*

Abstract. On the basis of 5 years of data, a new local line of meteoric waters was constructed based on the ratio of stable oxygen and hydrogen isotopes at Yakutsk. This line allows you to see the interannual variability of climatic conditions for Central Yakutia. A comparison with the isotopic composition of ground ice in Central Yakutia and North-East Siberia has been made.

Keywords: stable isotopes of oxygen and hydrogen, d-excess, local meteoric water line, precipitates, ice wedges.

С 2017 г. по настоящее время на территории ИМЗ СО РАН в г. Якутске ведутся регулярные наблюдения за изменениями изотопного состава зимних и летних атмосферных осадков Центральной Якутии. Эти наблюдения ведутся с целью построения новой локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ), которая позволяет охарактеризовать современные межгодовые климатические процессы на локальном и региональном уровне. Это важная информация, которую необходимо использовать при интерпретации изотопных данных по поверхностным и подземным водам и подземным льдам (повторно-жильным и текстурным), которые во многом формируются за счет атмосферных осадков.

Анализ состава стабильных изотопов кислорода $\delta^{18}\text{O}$ и водорода δD проводился на лазерном спектрометре Picarro L-2140i в совместной российско-германской лаборатории по изучению стабильных изотопов воды льда и снега в Институте мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН в г. Якутске. В основе работы прибора лежит метод лазерной абсорбционной ИК-спектрометрии. В ходе анализа применялись внутренние стандарты воды лаборатории стабильных изотопов Института им. А. Вегенера (г. Потсдам, Германия). Калибровка выполнялась не менее 3 раз за один стандартный запуск кассеты из 33 жидких образцов. По окончании анализа величины 1σ для $\delta^{18}\text{O}$ и δD корректировались по

комбинированному стандартному отклонению на основе методики (*van Geldern, Barth, 2012*), что позволяет достичь воспроизводимости на уровне 0,01 % для $\delta^{18}\text{O}$ и 0,05 % для δD . Статистическая обработка результатов включала в себя оценку дейтериевого эксцесса d_{exc} и основных статистических характеристик стандартными способами, построение графиков в координатах $\delta^{18}\text{O} / \delta\text{D}$, сравнение с данными глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ), расчет средних значений и стандартного отклонения. Дейтериевый эксцесс (d_{exc}) играет важную роль в интерпретации климата, позволяя реконструировать условия испарения и конденсации (то есть относительную влажность, температуру водной поверхности) в районе источника влаги. Показатель рассчитывается следующим образом: $d_{\text{exc}} = \delta\text{D} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$ (*Dansgaard, 1964*).

В табл. 1. представлены новые результаты обобщения по мониторингу атмосферных осадков в сравнении с предыдущими исследователями (*Kurita et.al., 2004, Папина и др., 2017*).

Таблица 1

Локальная линия метеорных вод г. Якутск, 1996–2022 гг.

Локальная линия метеорных вод Якутска	Кол-во проб	$\delta^{18}\text{O} + \text{St.Dev.}$, ‰	$\delta\text{D} + \text{St.Dev.}$, ‰	$d_{\text{exc}} + \text{St.Dev.}$, ‰	Уравнение регрессии	R ²
ЛЛМВ 1996–2000 (<i>Kurita et.al., 2004</i>)	54	-23,6±8,8	-186,1±69,3	2,9±7,0	$\delta\text{D} = 7,81 \times \delta^{18}\text{O} - 1,57$	0,99
ЛЛМВ холодный сезон 10.2013–09.2014 (<i>Папина и др., 2017</i>)	8	-31,7	-237,1	16,1	$\delta\text{D} = 8,17 \times \delta^{18}\text{O} + 21,94$	0,99
ЛЛМВ теплый сезон 10.2013–09.2014 (<i>Папина и др., 2017</i>)	23	-13,0	-109,3	-5,3	$\delta\text{D} = 7,22 \times \delta^{18}\text{O} - 18,92$	0,95
ЛЛМВ среднегодовое значение 10.2013–09.2014 (<i>Папина и др., 2017</i>)	31	-18,6	-147,6	1,1		
ЛЛМВ холодный сезон 09.2017–09.2022 (новые данные)	140	-30,2±6,6	-234,3±54,8	7,1±8,0	$\delta\text{D} = 8,17 \times \delta^{18}\text{O} + 12,21$	0,98
ЛЛМВ теплый сезон 09.2017–09.2022 (новые данные)	68	-13,4±4,2	-111,4±30,3	-4,2±9,3	$\delta\text{D} = 6,97 \times \delta^{18}\text{O} - 18,01$	0,92
ЛЛМВ среднегодовое значение 09.2017–09.2022 (новые данные)	208	-24,7±9,9	-194,1±75,2	3,4±10,0	$\delta\text{D} = 7,56 \times \delta^{18}\text{O} - 7,45$	0,99

Из полученных данных видно, что годовая ЛЛМВ стала несколько легче по составу, а значения по d_{exc} в летний и холодный сезоны стали более низкими, что свидетельствует о возросшей роли испарительного процесса за последние 5 лет. Сопоставление средних

значений изотопов $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ показало сходство состава неоплейстоценовых повторно-жильных льдов Центральной Якутии (Popp et al., 2006, Галанин и др., 2019) и Северо-Востока Сибири (Торговкин и др., 2022) со средними значениями зимних атмосферных осадков. Установленные значения варьируют в пределах $-29 \dots -32 \%$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $-233 \dots -256 \%$ по δD . В свою очередь, средние значения изотопного состава $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ по текстурным льдам этих регионов имеют на $2-3 \%$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $20-25 \%$ по δD более легкие значения по сравнению со средними значениями годовых осадков. Сопоставление средних значений повторно-жильных льдов и современных зимних осадков по d_{exs} показало наибольшую схожесть для голоценовых повторно-жильных льдов хребта Черского. Повторно-жильные льды Центральной Якутии имеют d_{exs} на $1-2 \%$ выше, а d_{exs} неоплейстоценовых повторно-жильных льдов хребта Черского – напротив, на 2% ниже. У текстурных льдов d_{exs} в среднем в $2-4$ раза выше, чем у среднегодовых осадков, что, вероятно, связано с высокой скоростью промерзания вод сезонно-талого слоя и преобладанием процесса конденсации при их формировании.

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

Литература

- Галанин, А. А., Павлова, М. Р., Папина, Т. С., Эйрих, А. Н., Павлова, Н. А. Стабильные изотопы ^{18}O и D в ключевых компонентах водного стока и криолитозоны Центральной Якутии (Восточная Сибирь) / А. А. Галанин [и др.] // Лёд и Снег. – 2019. – №59(3). – С. 333–354. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-414>.
- Папина, Т. С., Малыгина, Н. С., Эйрих, А. Н., Галанин, А. А., Железняк, М. Н. Изотопный состав и источники атмосферных осадков в Центральной Якутии / Т. С. Папина [и др.] // Криосфера Земли. – 2017. – Т. XXI. – № 2. – С. 60–69.
- Торговкин, Н. В., Тумской, В. Е., Романис, Т. В. Изотопный состав и гидрохимия подземных льдов юго-востока хребта Черского / Н. В. Торговкин, В. Е. Тумской, Т. В. Романис // Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России : материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 65-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН. – Якутск, 2022. – С. 490–493. DOI: 10.52994/9785751332846_2022_101.
- Dansgaard, W. Stable isotope in precipitation // Tellus 1964. V XVI. № 4. P. 436–468.
- Kurita, N., Sugimoto, A., Fujii, Y., Fukazawa, T., Makarov, V. N., Watanabe, O., Ichianagi, K., Numaguti, A., Yoshida, N. Isotopic composition and origin of snow over Siberia // Journ. of Geophys. Research. 2005. V. 110. D13102. doi: 10.1029/2004JD005053.
- Popp, S., Diekmann, B., Meyer, H., Siegert, C., Syromyatnikov, I., and Hubberten, H.-W. (2006). Palaeoclimate Signals as Inferred from Stable-Isotope Composition of Ground Ice in the Verkhoyansk Foreland, Central Yakutia. Permafrost Periglac. Process. 17 (2), 119–132. doi:10.1002/ppp.556.
- Van Geldern, R., Barth, J. Optimization of instrument setup and post-run corrections for oxygen and hydrogen stable isotope measurements of water by isotope ratio infrared spectroscopy (IRIS). Limnology and Oceanography Methods, 2012, vol. 10. – p. 1024–1036. <https://dx.doi.org/10.4319/lom.2012.10.1024>.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕРЗЛОТЕ

Б.А.Трифонов¹, С.Ю. Милановский^{1,2}, С.А. Великин^{3*}, В.А. Истратов⁴

1 – Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия

2 – Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

3 – Вилюйская научно-исследовательская мерзлотная станция ИМЗ СО РАН,
пос. Чернышевский, Россия

4 – ООО «РАДИОНДА», г. Москва, Россия

* frozen@mirny.sakha.ru

Аннотация. Мерзлота распространена в России во многих горнорудных, нефтяных районах с соответствующей инфраструктурой. Известно, что часть территории криолитозоны сейсмоактивна. В связи с изменением климата и возможной деградацией мерзлоты, в том числе под воздействием антропогенных факторов, необходимы комплексные геофизические исследования геокриологических разрезов и свойств грунтов. Важны исследования процессов, влияющих на состояние мерзлоты при проведении сейсмического микрорайонирования. Решения этих задач требуют оценки влияния природных и антропогенных (техногенных) факторов на спектральный состав и динамический диапазон колебаний верхних слоев разреза при землетрясениях. Влияния сезонных факторов и долгосрочных температурных трендов на изменение колебаний могут быть использованы для прогноза изменения сейсмических условий в сейсмоактивных районах. Рассмотрен ряд сейсмогеокриологических моделей, которые могут быть использованы для решения инженерно-геокриологических задач в сейсмологии. Обосновывается необходимость проведения геофизического мониторинга криолитозоны вблизи крупных инженерных сооружений для прогноза деградации мерзлоты. Предлагается оценка сейсмической опасности на основе расчетных методов.

Ключевые слова: мерзлота, сейсмичность, мониторинг, спектры, свойства грунтов.

SEISMIC IMPACTS ON PERMAFROST

B.A. Trifonov¹, S.Yu. Milanovsky^{1,2}, S.A. Velikin^{3*}, V.A. Istratov⁴

1 – Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия

2 – Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

3 – Вилюйская научно-исследовательская мерзлотная станция ИМЗ СО РАН,
пос. Чернышевский, Россия

4 – ООО «РАДИОНДА», г. Москва, Россия

* frozen@mirny.sakha.ru

Abstract. Permafrost rocks are common in Russia in many mining and oil regions with appropriate infrastructure. It is known that part of permafrost zone is seismically active. In connection with climate change and possible degradation of permafrost, influencing anthropogenic factors, complex geophysical studies of geocryological sections and soil properties are required. It is important to study the processes affecting state of permafrost from the standpoint of seismic zoning. Solving these problems requires an assessment of the influence of natural and anthropogenic (technogenic) factors on spectral composition and dynamic range of seismic vibrations in the upper layers of section during earthquakes. The influence seasonal and long-term temperature trends on seismic vibrations can be used for predicting changes in seismic conditions in active seismic regions. We present generalization of soils seismic properties and their reflection in the field of elastic waves velocities and oscillation amplitudes. A number of seismo-geocryological models are considered, which can be used for solving engineering-geocryological problems in seismology. The necessity of carrying out geophysical monitoring of the permafrost zone near large engineering structures, to predict permafrost degradation, is substantiated. An assessment of seismic hazard based on calculation methods is proposed.

Keywords: permafrost, seismicity, monitoring, spectra, soil properties.

Проектирование, строительство и эксплуатация сооружений в районах распространения многолетнемерзлых пород приобретает важное значение в связи с изменением климата и деградацией мерзлоты (Анисимов, Стрелецкий, 2015; Anisimov, 2022; Streletskiy et al., 2019). Переход грунта из мерзлого в талое состояние сопровождается изменением его физических свойств, что вызывает необходимость их учета при прогнозе параметров сейсмических воздействий, особенно для ответственных промышленных сооружений. (Фролов, 1998). Примером могут служить взаимодействия гидротехнических

сооружений, АЭС или структуры нефтегазового комплекса с криосферой. Для опережающего контроля процессов оттайки мерзлых массивов нужен комплекс современных геофизических инструментов (*Истратов, Великин, 2023; Milanovskiy et al., 2019*). Известно, что интенсивность проявления землетрясений на поверхности во многом зависит от условий, связанных с сейсмическими характеристиками грунтов, слагающих верхнюю зону разреза. Сейсмические характеристики, такие, как скорости распространения сейсмических волн, амплитудный уровень и частотный состав колебаний грунта, находятся в прямой зависимости от строения геологического разреза и физико-механических свойств грунта (*Воронков, 2009; Джурик и др., 2011, 2022; Седов, 1988*). Эта задача может быть решена расчетными методами СМР, если достаточно надежно спрогнозировать изменение упругих параметров грунтов в новом их состоянии (*Джурик и др., 2022, 2011; Трифонов и др., 2022*).

Исследования на грунтах криолитозоны показывают, что для проектирования сейсмостойких сооружений с учетом деградации мерзлоты необходимо определение сейсмических характеристик и параметров сейсмических воздействий для основных разновидностей грунтов, слагающих геокриологический разрез. Сейсмогрунтовые модели, по которым рассчитываются характеристики сейсмических воздействий, послойно описываются набором параметров: скоростями продольных (V_p) и поперечных волн (V_s), значениями объемных плотностей (ρ), мощностью слоев (H), характеристиками затухания. При этом грунтовые комплексы могут находиться в талом воздушно-сухом, талом обводненном, слабльдистом ($-1\text{ }^{\circ}\text{C} < t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), твердомерзлом ($t < -2\text{ }^{\circ}\text{C}$) состояниях, в которых даже у грунтов одного типа значения скоростей могут очень сильно изменяться. Процесс деградации мерзлоты тесно связан с развитием талика (*Rangel et al., 2021*). На его важную роль, как демпфера, при сейсмическом воздействии обращал внимание *Б.М. Седов (1988)*. Экспериментальный и модельный опыт изучения развития таликов при гидротехнических сооружениях на мерзлоте имеется и у авторов доклада (*Milanovskiy et al., 2008*). Для решения задач геодинамической безопасности горнодобывающих и нефтегазовых сооружений российского сектора Арктики обязательным условием должен являться многоуровневый системный мониторинг геологической среды (*Великин, 2020; Великин, Шестернев, 2015; Истратов, Великин, 2023; Трифонов и др., 2022*). Такой мониторинг должен включать традиционные сейсмические и сейсмологические методы, электрометрию, радиоволновое просвечивание, георадарное зондирование. Обязательным элементом для ответственных сооружений должен являться прогноз их сейсмической опасности на случай частичной или полной деградации мерзлоты. При изысканиях в северных регионах практически все площадки имеют сложные, неоднородные по простиранию и глубине мерзлотно-грунтовые условия. Зачастую практически невозможно обеспечить требования

СП 25.13330.2012 по использованию грунтов площадки (даже для отдельного сооружения) по единому принципу – в мерзлом (принцип I) или талом (принцип II) состоянии. Исследования показывают, что при достаточном для построения геосейсмических моделей наборе параметров можно обеспечить получение характеристик сейсмических воздействий, необходимых для проектирования сейсмостойких сооружений в активной сейсмической зоне и для сложных геокриологических условий.

Необходимо создание и экспериментальное обеспечение инженерно-сейсмологических полигонов для проведения сейсмического мониторинга с учетом распределения региональной сотрясаемости при сейсмических воздействиях в промышленных и населенных районах на участках распространения мерзлых грунтов в связи с изменением климата и влиянием техногенеза.

Литература

Анисимов О.А., Стрелецкий Д.А. Геокриологические риски при таянии многолетнемерзлых грунтов // Арктика XXI век. Естественные науки. – 2015. – № 2 (3). – С. 60–74.

Великин С.А. Комплексное геофизическое изучение инженерно-геокриологического состояния оснований гидро- и горнотехнических сооружений Якутской алмазной провинции // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Якутск, 2020. – 316 с.

Великин С.А., Истратов В.А. Возможности оценки геокриологического состояния многолетнемерзлых пород в процессе взаимодействия природно-техногенных систем с помощью технологии радиоволновой и диэлектрической геоинтроскопии межскважинного пространства (РВГИ-ДИМЧ) на примере участка обходной фильтрации правобережного примыкания Вилюйской ГЭС-1 : сборник докладов. – 2023.

Великин С.А., Шестернев Д.М. Научно-методические основы геофизического мониторинга гидро- и горнотехнических сооружений в криолитозоне Якутской алмазоносной провинции // Инженерная, угольная и рудная геофизика. Современное состояние и перспективы развития. – 2015. – С. 184–196.

Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов). – СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2009. – 401 с.

Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П., Ескин А.Ю. Оценка сейсмических воздействий сильных землетрясений в различных мерзлотных и сейсмических зонах Монголо-Сибирского региона // Геодинамика и тектонофизика. – Т. 13, вып. 2. – 2022. – С. 1–7.

Джурик В.И., Серебренников С.П., Ескин А.Ю., Усынин Л.А., Брыжак Е.В., Шагун А.Н. Инженерно-сейсмологическое обеспечение безопасности строительства линейных сооружений в сейсмоактивных районах Южной Якутии с учетом деградации мерзлоты // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – Т. 4, № 1. – 2011. – С. 60–78.

Седов Б.М. Сейсмические исследования в районах многолетней мерзлоты. – М.: Наука, 1988. – 184 с.

Трифонов Б.А., Милановский С. Ю., Несынов В.В. Оценка сейсмических воздействий в условиях деградации мерзлоты // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – Т. 56, № 4. – 2022. – С. 59–74.

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. – Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. – 515 с.

Anisimov O.A. Climate change in the Russian Arctic: risks and new opportunities. Assessment report — Moscow: Publisher: Moscow school of business management, 2022 - 106p.

Milanovskiy S., S. Velikin, A. Cherepanov, A. Petrunin, V. Istratov. Permafrost and objects of economic activity in Siberia – risks and facts. // 27th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, abstract № IUGG19-0488, Montreal, Canada, 2019.

Milanovskiy S., Velikin S. & Istratov V. Geophysical Study of Talik Zones (Western Yakutia)// In: Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost University of Alaska Fairbanks (Edited by Douglas L. Kane and Kenneth M. Hinkel), 2 – 2008 – Pp.1221-1226.

Rangel, R. C., Parsekian, A. D., Farquharson, L. M., Jones, B. M., Ohara, N., Creighton, A. L., et al. Geophysical observations of taliks below drained lake basins on the Arctic Coastal Plain of Alaska. // Journal of Geophysical Research: Solid Earth, V. 126 – 2021 – Pp. 1-21.

Streletskiy D. A., Suter L., 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 // Environ. Res. Lett. V. 14. №025003 – 2019 – Pp.1-15.

ПОЛИГОНАЛЬНЫЕ ТОРФЯНИКИ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПРИ АНТРОПОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ФОНЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

А.В. Хомутов^{1,2*}, Е.М. Бабкин¹, Е.А. Бабкина¹, М.М. Данько¹, Р.Р. Хайруллин¹,
Е.С. Королева^{1,3}

1 – *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия*

2 – *Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия*

3 – *Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Россия*

* akhomutov@gmail.com

Аннотация. Полигональные торфяники с полигонально-жильными льдами (ПЖЛ) широко распространены в подзоне южных тундр Западной Сибири. Вытаивание ПЖЛ приводит к изменению рельефа торфяников. Исследование состоит из двух аспектов (локального и регионального): 1) мониторинга торфяников на ключевом участке в северной части Пур-Тазовского междуречья; 2) дистанционного анализа распространения полигональных торфяников в северо-восточной части Западной Сибири. Анализ актуальных климатических данных и данных геоэкологического мониторинга подтверждает достаточно высокие темпы деградации ПЖЛ на исследуемой территории. Проведена детальная оценка данных мониторинга ключевых торфяников, включающего сопоставление темпов изменения поверхности в естественных условиях, при антропогенном воздействии и в зоне взаимодействия «торфяник – озеро». Данные мониторинга позволили экстраполировать полученные результаты на более обширную северо-восточную территорию Пур-Тазовского междуречья. В результате дистанционных исследований полигональных торфяников предварительно определен южный предел их распространения на северо-востоке Западной Сибири.

Ключевые слова: полигональные торфяники, полигонально-жильный лед, сезонно-талый слой, климатические колебания, антропогенное воздействие, дистанционное зондирование.

POLYGONAL PEATLANDS IN THE NORTH-EAST OF WEST SIBERIA UNDER ANTHROPOGENIC IMPACT WITH CLIMATE CHANGE

A.V. Khomutov^{1,2*}, E.M. Babkin¹, E.A. Babkina¹, M.M. Danko¹, R.R. Khairullin¹, E.S. Koroleva^{1,3}

1 – *Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia*

2 – *University of Tyumen, Tyumen, Russia*

3 – *Arctic Research Center, Salekhard, Russia*

* akhomutov@gmail.com

Abstract. Polygonal peatlands with ice wedges are widely distributed in the southern tundra subzone of West Siberia. Thawing of ice wedges controls dynamics of polygonal peatland topography. Our study comprises two aspects (local and regional, respectively): (1) peatland monitoring in the key site in the northern part of Pur-Taz interfluvium, and (2) analysis of remote sensing data covering polygonal peatlands in the North-East of West Siberia. Processing of current weather records and field monitoring of permafrost properties confirmed a fairly high rate of polygonal ice wedge degradation in the study area. Detailed assessment of key peatland monitoring data, including comparison of the rates of terrain changes in natural conditions and under the anthropogenic impact, as well as in the "peatland-lake" interaction zone was undertaken. Monitoring data allowed to extrapolate detected patterns to the entire north-eastern part of the Pur-Taz interfluvium. Remote sensing of polygonal peatlands preliminarily allowed to define southern boundary of their distribution in the North-East of West Siberia.

Keywords: polygonal peatland, ice wedge, active layer, climate fluctuations, anthropogenic impact, remote sensing.

В активно осваиваемой северо-восточной части Западной Сибири повсеместно распространены полигональные торфяники с многолетнемёрзлыми породами (ММП) и полигонально-жильными льдами (ПЖЛ). П.И. Каушерюк (1985) к полигональным относит торфяники, характеризующиеся наиболее низкой степенью вертикальной выраженности элементов микрорельефа и подразделяет их на валиковополигональные, плоскополигональные и бугристополигональные. Любое антропогенное вмешательство приводит к изменению компонентов ландшафта торфяников, начиная с растительного покрова и заканчивая ММП и ПЖЛ, до возможной полной деградации торфяных массивов.

Анализ климатических условий и данных мониторинга геокриологических условий в районе исследований на севере Пур-Тазовского междуречья подтверждает, что начиная с 2012 г. наблюдаются существенные изменения климатических условий, результатом которых является усиление процесса деградации подземных льдов, характерных для района исследований, осложняющееся и имеющее более высокие темпы при участии техногенных факторов развития криогенных процессов и растепления верхней части ММП.

Для оценки устойчивости и выделения критериев стабильности полигональных торфяников был проведен комплекс геокриологических исследований, который помимо мониторинга за глубиной сезонного протаивания и температурой ММП, включал БПЛА-съемку и изучение криолитологического строения торфяных массивов.

В результате было выявлено, что одним из критериев устойчивости торфяных массивов может служить наличие промежуточного слоя, который является защитной (буферной) зоной для ММП. В разрезах торфяников было выделено несколько промежуточных слоев или защитных зон (*Королева и др., 2021*), поэтому даже при сохранении современного тренда потепления и частичном вытаивании переходного слоя, торфяники можно считать устойчивой системой.

Сопоставление материалов БПЛА-съемки с высокодетальными космическими снимками дало представительный ряд геоинформационных материалов, что в сочетании с результатами геокриологических и криолитологических исследований, а также с первыми результатами изучения изменений в зоне взаимодействия «торфяник – озеро» (*Данько и др., 2021*), позволило найти подходы к разработке критериев устойчивости полигональных торфяников к антропогенному воздействию с учетом современных климатических изменений. В качестве критериев разработаны коэффициенты, основанные на статистическом анализе изменений, происходящих с рельефом полигональных торфяников под воздействием климатических и антропогенных факторов. Чем меньше коэффициенты, тем устойчивей полигональный торфяник. На основе полученных результатов создана карта потенциальной устойчивости полигональных торфяников к антропогенному воздействию с учетом современных климатических изменений (рисунок 1). Полигональные торфяники подразделены на относительно устойчивые, слабоустойчивые и неустойчивые к антропогенному воздействию с учетом современных климатических изменений. Степень их устойчивости осложняется влиянием водных объектов и современной техногенной нагрузкой.

Для дальнейшей экстраполяции полученных результатов на весь северо-восток Западной Сибири необходима оценка распространения и различий полигональных торфяников на всем протяжении Тазовского и Гыданского полуостровов и более обширной

части Пур-Тазовского междуречья. В связи с этим на этой территории проводится анализ открытых данных дистанционного зондирования, включающий детальную инвентаризацию полигональных торфяников (Хомутов и др., 2022) для их дальнейшей типизации. Предварительные результаты позволили определить южный предел распространения полигональных торфяников – 66°00”–66°30” с.ш. (с запада территория исследования ограничена устьем р. Надым, с востока – долиной р. Таз).

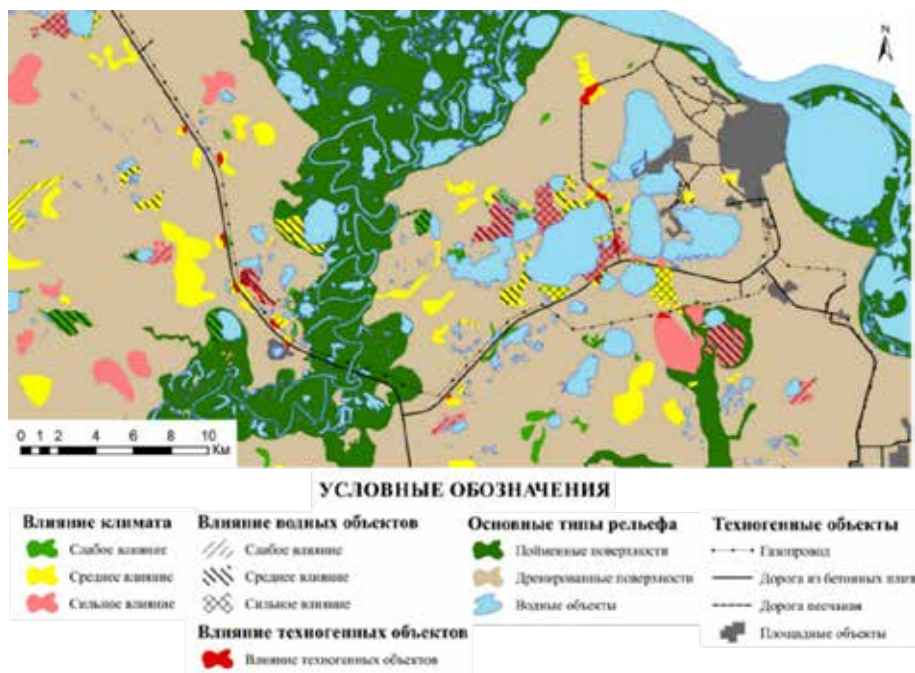


Рисунок 1. Фрагмент карты потенциальной устойчивости полигональных торфяников к антропогенному воздействию с учетом современных климатических изменений.

Исследование проведено при частичной финансовой поддержке РФФИ и Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научного проекта № 19-45-890011. Методические подходы разрабатываются при выполнении работы по госзаданию № 121041600042-7.

Литература

- Данько М.М., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Трансформация полигональных торфяников при взаимодействии с озерами на севере Пур-Тазовского междуречья: дистанционные и наземные методы мониторинга // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. – Салехард, 2021. – С. 111–113.
- Кашперюк П.И. Типы и инженерно-геологические особенности многолетнемерзлых торфяных массивов севера Западно-Сибирской плиты // Дис. канд. геол.-мин. наук. – М., 1985.
- Королева Е.С., Слагода Е.А., Мельников В.П. и др. Идентификационные признаки переходного и промежуточного слоев в полигональных торфяниках севера Западной Сибири // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. – 2021. – Т. 498, № 2. – С. 131–137.
- Хомутов А.В., Королева Е.С., Данько М.М., Хайруллин Р.Р. Полигональные торфяники севера Западной Сибири: распространение и вопросы классификации // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г.: сборник статей. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. – С. 745–751.

ДВА ИННОВАЦИОННЫХ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

Л.Н. Хрусталеv*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

**lev_kh@rambler.ru*

Аннотация. Рассматриваются два изобретения: конструкция стационарной ледостойкой платформы для бурения на нефть и газ на арктическом шельфе в виде ледогрунтового острова и способ защиты ледяного тела острова от оттаивания под действием тепла от поступающего по скважине флюида. Эти изобретения существенно увеличивают надежность и снижают стоимость буровой платформы при глубине моря до 37 м.

Ключевые слова: арктический шельф, ледогрунтовый остров, способ защиты от оттаивания, надежность, стоимость.

TWO INNOVATIVE PROPOSALS FOR THE DEVELOPMENT OF THE ARCTIC SHELF

L.N. Khrustalev*

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**lev_kh@rambler.ru*

Abstract. Two inventions are considered: the design of a stationary ice-resistant platform in the form of an ice-ground island for drilling for oil and gas on the Arctic shelf; a method for protecting the ice body of the island from thawing from the heat from the fluid going through the well. These inventions significantly increase the reliability and reduce the cost of the drilling platform at sea depths up to 37 m.

Keywords: arctic shelf, ice-ground island, method of protection from thawing, reliability, cost.

Под континентальным шельфом понимается прибрежная зона морей от береговой линии до материкового склона, ширина которой составляет от 100 до 900 км. По последним оценкам, на шельфе находится примерно 70 % всех углеводородов земного шара. Главное отличие арктического шельфа от остальных – наличие надводного и подводного льдов. Лед создает большие проблемы при хозяйственном освоении шельфа. Надводный лед, дрейфуя под действием ветра и течений, оказывает давление на гидротехнические сооружения, превосходящее штормовые давления волн при ураганных ветрах. Подводный лед формирует особые свойства породы, негативно влияющие на надежность сооружений.

Самыми надежными платформами, используемыми для бурения на нефть и газ на шельфе арктических морей, являются грунтовые острова. Однако из-за большого объема строительного материала они получили распространение только на мелководье. С увеличением глубины моря острова по своим экономическим показателям уступают стальным стационарным платформам. Граница раздела проходит примерно на глубинах 10 м. Эту границу можно существенно сдвинуть в сторону моря, если совместно с грунтом использовать в качестве строительного материала островов лед, намораживаемый из морской воды. Расчеты показывают, что ледогрунтовые острова технически возможно возводить в акваториях, где глубина моря составляет до 37 м. Это значительно расширяет ареал применения островов в качестве ледостойких стационарных платформ (ЛСП).

Разработанная нами (*Городецкий и др., 1984*) конструкция острова состоит из замороженного на обрезанную по периметру ЛСП льдину морской воды, покрытую грунтом

на величину слоя сезонного оттаивания. Вокруг подводной части ледяного тела и частично надводной на величину набега волны и напоязания льда устроена грунтовая призма, в которую установлена замораживающая система в виде ряда сезонно-действующих охлаждающих установок (СОУ), погружаемых через грунтовую призму в дно моря. Крутизна откосов призмы принимается 1:3. В качестве крепления откоса используется камень, а также синтетические полипропиленовые мешки с песком или гравием объемом 0.4–2.0 м³, иногда мешки с цементным раствором (одна часть цемента и 4 части инертных), поверх которых укладываются стальные тросовые сети (для удержания элементов покрытий). Под крепление укладывается фильтр (геотекстиль). Остров в плане представляет окружность с диаметром, обеспечивающим размещение технологической площадки.

Предлагаемая конструкция имеет следующие преимущества: позволяет перекрывать глубины в 2-3 больше глубин, перекрываемых грунтовыми островами; в пределах перекрываемых глубин быть более дешевой конструкцией, чем грунтовые и стальные ЛСП; обеспечить высокую надежность в течение всего срока эксплуатации; обеспечить восстановление нарушенных природных условий после окончания эксплуатации за счет снятия волновой защиты острова и его уничтожения морем естественным путем.

Описанный выше ледогрунтовый остров возможен только в том случае, если добывающие скважины не будут вызывать оттаивание входящего в состав острова льда. Такая конструкция скважины была разработана на геологическом факультете МГУ в 2015 году (*Хрусталева и др., 2015*). Конструкция скважины в пределах ледяного тела включает специальное устройство – зеротор, который аккумулирует все тепло, поступающее от транспортируемого продукта в окружающую среду и тем самым не допускает оттаивания льда. Накапливаемое в зероторе тепло периодически удаляется холодильной машиной. Зеротор представляет собой цилиндрическую полость, расположенную между эксплуатационной колонной и кондуктором, заполненную водным раствором этиленгликоля с отрицательной температурой фазового перехода. Внутри зеротора размещены охлаждающие колонки, замораживающие раствор. Во избежание деформации стенок зеротора при расширении раствора при замерзании, на внутренней поверхности промежуточной колонны находится слой пористой резины с закрытыми порами, компенсирующий увеличение объема раствора при его замерзании. Аккумуляция тепла происходит за счет оттаивания раствора, после чего он вновь замораживается.

В заключение отметим следующее: хозяйственное освоение Арктики требует больших усилий и материальных затрат, которые можно существенно сократить, если на службу поставить природные ресурсы Арктики, а именно мороз и лед. Таким образом можно значительно сократить затраты на строительный материал для гидротехнических сооружений

и его транспортировку, а также обеспечить высокую надежность сооружений, если в качестве ЛСП для добычи нефти и газа использовать предложенный нами ледогрунтовый остров. Создание такой конструкции ЛСП стало возможным после изобретения добывающей скважины, не вызывающей оттаивания вмещающей среды.

Внедрение этих двух изобретений в практику явится новым шагом технического прогресса в деле освоения природных ресурсов акваторий арктических морей.

Литература

Городецкий С.Э., Хрусталева Л.Н., Садовский А.В. Способ возведения ледяной платформы. А.С. № 1092241, Бюл. № 18, 1984.

Хрусталева Л.Н., Чувилин Е.М., Гунар А.Ю. Устройство для ликвидации тепловых потоков от добывающей скважины в многолетнемерзлые породы. Патент на полезную модель № 156025. Бюл. № 30, 2015.

IMPACTS OF FOREST FIRES ON THE PERMAFROST ENVIRONMENT IN THE DA XING'ANLING MOUNTAINS, NORTHEAST CHINA

Huijun Jin*, Xiaoying Li, Xiaoying Jin

School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China

** hjjin@nefu.edu.cn*

Abstract. In boreal and arctic regions, forest fires exert great influences on biogeochemical processes, hydrothermal dynamics of the active layer and near-surface permafrost, and subsequent nutrient cycles. Forest fires could result in an irreversible degradation of permafrost, successions of boreal forests, rapid losses of soil carbon stock, and extensively increased frost hazards. After forest fires, soil temperatures rise; active layer thickens; the release of soil carbon and nitrogen enhances, and; vegetation changes from coniferous forests to broad-leaved forests, shrublands or grasslands. This study chose the northern Da Xing'anling (Hinggan) Mountains, Northeast China (1-32 years after the fire) as the research region. Using the "spatial variations as a substitute for temporal changes (chronosequence approach)" and combining the methods of field investigations and observations, laboratory testing and experimental analyses, remote sensing inversions and numerical model simulation, we systematically studied the effects of forest fire on the permafrost environment in the northern Da Xing'anling (Hinggan) Mountains, Northeast China. The results showed that: 1) After forest fires, plant species in the vegetation of burned area succeeded evidently. The species and covers of herbs and shrubs increased rapidly in a short period after fire, but they began to decrease with elapsing time after fire; the species and cover of trees increased, and; the hemiboreal vegetation gradually changed from coniferous forest to coniferous and broad-leaved mixed forests. Vegetation NDVI declined significantly after fire; however, NDVI largely recovered to the pre-fire level in 10-12 years after fire. 2) Forest fire has an evident effect on the hydrothermal regimes of permafrost and active layer: with increasing fire severity, the ground temperature increases gradually, the active layer thickens, and soil moisture content declines. The fire affected depth of regarding ground hydrothermal regimes was greater than 20 m in the 9th year after fire. The time of fire influence was longer than 30 years. In other words, the hydrothermal regimes of permafrost did not recover to the pre-fire level 30 years after fire. 3) Forest fire can significantly reduce the contents of soil total organic carbon and total nitrogen, and; with the increasing fire severity, these contents decrease more obviously. Forest fire can also lead to the increases or decreases in contents of total and available phosphorus and total and available potassium. 4) Simultaneous Heat and Water (SHAW) model can well simulate the effects of vegetation height, vegetation leaf area index and organic layer thickness on soil moisture contents and temperatures under different fire severity, and can be used to qualitatively evaluate the effects of forest fire on ground hydrothermal regimes. Forest fires lead to thinned organic layer, damaged or removed organic layer, reduced surface albedo, and increased thermal conductivity of surface soils, leading to the increased soil temperature and active layer thickness and the decreased soil moisture content. As a result, permafrost degrades rapidly, forming thermokarst depressions and ponds on the surface. These results have provided key scientific bases for systematic studies and scientific assessment on the effects of forest fire on the boreal forest ecosystem and for according prudent management and protection of boreal forest environment and resources.

Keywords: forest fires; Permafrost degradation; Hydrothermal processes; Active layer; Impacts.

ВЛИЯНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ЛАНДШАФТЫ КРИОЛИТОЗОНЫ БОЛЬШОГО ХИНГАНА (СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ КИТАЙ)

Хуэйцзюнь Цзинь*, Сяоин Ли, Сяоин Цзинь

Факультет гражданского строительства Северо-Восточного университета лесного хозяйства, г. Харбин, Китай

** hjjin@nefu.edu.cn*

Аннотация. В бореальных и арктических регионах лесные пожары оказывают большое влияние на биогеохимические процессы, динамику тепловлажностного режима деятельного слоя и верхних горизонтов многолетнемерзлых пород, а также на последующий круговорот питательных веществ. Лесные пожары могут привести к необратимой деградации многолетней мерзлоты, смещению бореальных лесов, быстрой потере запасов углерода в почве и активизации опасных криогенных процессов. После лесных пожаров наблюдается повышение температуры почв, увеличение мощности сезонно-талого слоя, высвобождение почвенного углерода и азота, смена хвойных лесов широколиственными лесами, кустарниковой или травянистой растительностью. В данной работе районом исследований выбрана северная часть хребта Да Синьянлин (Большой Хинган) на северо-востоке Китая (1–32 года после пожара). Комплексное изучение воздействия лесных пожаров на ландшафты криолитозоны северной части Большого Хингана проведено на основе методики хронопоследовательности (chronosequence), т.е. использования пространственной изменчивости взамен временной изменчивости, с применением методов полевых исследований и наблюдений, лабораторных определений и экспериментальных анализов, инверсий данных дистанционного зондирования и численного моделирования. Полученные результаты показали следующее:

1) после лесных пожаров происходит быстрое возобновление растительности на горях. В первые послепожарные годы видовой состав и покрытие кустарниковой и травянистой растительности быстро увеличиваются, но с течением времени снижаются; начинает увеличиваться видовой состав и покрытие деревьев, полубореальный тип растительности постепенно сменяется с хвойного леса на хвойно-широколиственные смешанные леса. Нормализованный относительный вегетационный индекс NDVI значительно снижается после пожара, но через 10–12 лет в целом восстанавливается до допожарного уровня;

2) лесные пожары оказывают существенное влияние на водно-тепловой режим ММП и СТС: с увеличением интенсивности пожара наблюдается постепенное повышение температуры пород, увеличение глубины сезонного протаивания и снижение влажности почв. На 9-й год после пожара зона воздействия на водно-тепловой режим пород распространилась на глубину более 20 м. Время такого воздействия составило не менее 30 лет. Иными словами, тепловлажностный режим ММП так и не восстановился спустя 30 лет;

3) лесные пожары могут привести к значительному снижению содержания общего органического углерода и азота в почве, при этом чем выше интенсивность пожара, тем существеннее снижение. Кроме того, пожары могут привести к увеличению или снижению содержания общего и доступного фосфора, а также общего и доступного калия;

4) модель SHAW (Simultaneous Heat and Water) адекватно описывает влияние высоты растительности, индекса листовой поверхности и мощности органического слоя на влажность и температуру почв при различной интенсивности пожаров и применима для качественной оценки влияния лесных пожаров на тепловлажностный режим пород. В результате лесных пожаров может происходить истончение, повреждение или удаление органического слоя, снижение альбедо поверхности, увеличение теплопроводности почв, что приводит к повышению температуры почв, увеличению глубины сезонного протаивания, уменьшению влажности почв. Все это ведет к быстрой деградации ММП, образованию термокарстовых понижений и обводнению поверхности. Полученные результаты являются основой для дальнейших исследований и оценки воздействия лесных пожаров на экосистемы бореальных лесов, а также для рационального природопользования в бореальной зоне.

Ключевые слова: лесные пожары, деградация криолитозоны, гидротермические процессы, деятельный слой, воздействие.

DRASTIC CHANGES OF WATER CYCLE UNDER CURRENT CLIMATE WARMING IN EASTERN SIBERIA

Tetsuya Hiyama¹, Hotaek Park^{1,2}, Tomonori Sato³, Liudmila Lebedeva⁴, and Alexander Fedorov⁴

1 – Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Japan

2 – Institute of Arctic Climate and Environment Research, JAMSTEC, Japan

3 – Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Japan

4 – Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russia

Abstract. Water cycle in the Arctic region, especially in northern Eurasia or Siberia, is drastically changing due to current climate warming. Atmospheric moisture transport toward Siberia that originated from Arctic Ocean evaporation has increased substantially in autumn to early winter when substantial sea ice retreat was observed. Consequently, river discharge in Siberia has also increased over the past several decades. However, the impact of permafrost thawing and of changing hydrological processes induced by climate warming on the winter river discharge is not well-quantified. Using a coupled land surface model and a distributed discharge model, we conducted trend analyses to examine the sensitivity of winter river discharge to permafrost thawing and water budget change in the Lena River basin. An increasing trend of winter baseflow was found in upper parts of both the Lena River basin and the Aldan River basin, where summer net precipitation showed a statistically significant increase. The increased summer net precipitation resulted in higher soil moisture in the deepened active layer in late summer and early autumn, which was linked to winter baseflow. This result suggests that the increased winter river discharge was strongly associated with enhancement of permafrost thawing and increase in net precipitation that consequently affected soil hydrological processes, which will be strengthened further in the context of climate warming.

Keywords: arctic sea ice retreat, atmospheric moisture transport toward Siberia, net precipitation, permafrost thawing, soil moisture, winter river discharge, Lena River basin.

РЕЗКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПРИ СОВРЕМЕННОМ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

Тецуя Хияма¹, Хотак Парк^{1,2}, Томонори Сато³, Людмила Лебедева⁴, Александр Федоров⁴

1 – Институт дистанционных исследований природной среды Земли Университета Нагоя, Япония

2 – Институт изучения климата и природы Арктики, Японское агентство морских и наземных исследований и технологий

3 – Факультет естественных наук Университета Хоккайдо, Япония

4 – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

Аннотация. Гидрологический цикл в Арктическом регионе, особенно на севере Евразии (Сибирь), существенно меняется из-за современного потепления климата. Осенью и в начале зимы на территории Сибири наблюдается значительное увеличение атмосферного привноса влаги, испаряемой с Северного Ледовитого океана, связанное с существенным сокращением морского ледяного покрова в этот период. Вследствие этого в последние десятилетия происходит увеличение стока рек Сибири. Однако влияние таяния многолетней мерзлоты и изменения гидрологических процессов при потеплении климата на зимний сток рек оценено недостаточно. С использованием совместной модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой и распределенной модели формирования стока, нами проведены анализы трендов для определения чувствительности зимнего расхода рек к таянию многолетней мерзлоты и изменению водного баланса в бассейне р. Лены. Полученные результаты показывают тренд увеличения зимнего базисного стока в верховьях бассейнов как р. Лены так и р. Алдана, где наблюдается статистически значимое увеличение чистого количества летних осадков. Увеличение чистого количества летних осадков привело к повышению влажности почв более мощного СТС в конце лета – начале осени, которое связано с зимним базисным стоком. Это свидетельствует о том, что увеличение зимнего расхода рек тесно связано с усилением таяния мерзлоты и увеличением чистого количества осадков, что в свою очередь влияет на гидрологические процессы в почвах, и этот тренд будет усиливаться при дальнейшем потеплении климата.

Ключевые слова: сокращение морского ледяного покрова Арктики, атмосферный привнос влаги в Сибирь, чистое количество осадков, таяние многолетнемерзлых пород, влажность почв, зимний расход рек, бассейн р. Лены.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
СЕКЦИЯ 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ДИНАМИКА КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ И СУБАКВАЛЬНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ	
Абрамов Д.А., Макарьева О.М., Землянскова А.А., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Егоров Е.Г. Новые данные о температуре грунтов бассейна верхней Колымы	5
Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Светлаков А.А., Пеллинен В.А. Горная криолитозона юга Восточной Сибири. Современное состояние в условиях изменяющегося климата	8
Андреева В.В., Спектор В.В., Константинов П.Я. Динамика температурного режима многолетнемерзлых пород на северо-востоке Колымской низменности	11
Григорьев М.Н. Динамика подводной мерзлоты в прибрежно-шельфовой зоне морей Лаптевых и Восточно-Сибирского	13
Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х. Моренные пьедесталы – феномен горной мерзлоты	16
Дроздов Д.С., Малкова Г.В., Коростелев Ю.В., Сироткин Д.В., Пижанкова Е.И., Попова А.А., Устинова Е.В. Адаптация методики геокриологической съёмки для государственного комплексного гидрогеологического и инженерно- геологического картирования масштаба 1:1 000 000	19
Ефремов В.Н. Геофизическая оценка трансформации нестационарных слоев мерзлой толщи	22
Захаров М.И., Гадаль С., Данилов Ю.Г., Черосов М.М. Изучение динамики горных мерзлотных ландшафтов северо-востока Сибири с использованием многолетних трендов NDVI по данным LANDSAT	25
Землянскова А.А., Оленченко В.В., Макарьева О.М. Результаты геофизических исследований на Анмангындинской наледи (Магаданская область)	28
Иванов Ю.Г. Оценка состояния грунтового массива по данным метода микросейсмического зондирования в криолитозоне	31
Иванова Р.Н. Районирование территории Восточной Сибири по изменению климатических переменных	34
Калачева Л.П., Иванова И.К., Портнягин А.С., Семенов М.Е., Иванов В.К., Аргунова К.К. Зоны стабильности гидратов метана и природного газа в подмерзлотных горизонтах с гидрокарбонатно-натриевым типом вод	37
Картозия А.А., Зольников И.Д., Добрецов Н.Н. Опыт использования геоинформационных технологий при изучении криолитозоны в ИГМ СО РАН	40

Коровина Д.И. Популяризация проблем мерзлотоведения с помощью специализированного информационного ресурса	42
Лебедева Л.С., Христофоров И.И., Данилов К.П., Горохов И.В. Распространение надмерзлотных таликов в сплошной криолитозоне Центральной Якутии	45
Михаревич М.В., Кузьмина С.А., Базилян А.Э., Лыткин В.М., Васильева А.Н. Результаты карпологического и энтомологического анализов для реконструкций криогенно-эоловых ландшафтов	48
Облогов Г.Е., Задорожная Н.А., Васильев А.А., Малкова Г.В. Продуцирование и эмиссия метана в доминантных ландшафтах типичной и южной тундры Западной Арктики	51
Осташов А.А., Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Землянскова А.А. Использование GNSS-профилей для верификации съёмки наледи с помощью БПЛА	54
Пономарева О.Е., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Гравис А.Г., Бердников Н.М., Устинова Е.В. Дифференциация ландшафтов южной тундры – северной тайги Западной Сибири по особенностям реакции на изменение климата	57
Романис Т.В., Тумской В.Е. Микроморфологические особенности едомных отложений: новый взгляд на архивные данные	60
Романовский В.Е. Потепление и оттаивание мерзлоты на Аляске: динамика и последствия	63
Скачков Ю.Б. Современные климатические нормы Якутии	65
Спектор В.Б. Гидрогенная катастрофа Восточной Арктики на рубеже плейстоцена и голоцена	69
Спектор В.В., Спектор В.Б., Бакулина Н.Т., Куть А.А., Торговкин Н.В. 100-метровая толща мерзлых четвертичных отложений на Лено-Амгинском междуречье: вопросы стратиграфии и криолитологии	72
Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А., Владов М.Л., Зыков Ю.Д., Неклюдов В.В., Оленченко В.В., Пушкарев П.Ю., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М. Геофизический мониторинг криолитозоны	75
Сысолятин Р.Г., Сериков С.И. Температурный режим многолетнемерзлых пород Восточной Якутии	78
Тумской В.Е., Романис Т.В. Ледовые комплексы долины р. Индигирки и их состояние	81
Чимитдоржиева Э.О., Чимитдоржиева Г.Д. Липиды в почвах криогенных форм рельефа	84
Чимитдоржиева Э.О. Липидный профиль холодных и мерзлотных почв	86

Чувилин Е.М., Екимова В.В. Роль солепереноса в дестабилизации внутримерзлотных газогидратов: результаты экспериментального моделирования	88
Шепелев А.Г. Черепанова А.М. Содержание углерода в голоценовых отложениях ледового комплекса дельты реки Лены	91
Шепелёв В.В., Иванова Р.Н. Исследования мерзлотно-грунтовой бригады Совета по изучению производительных сил Академии наук СССР в городе Якутске 1937 года	94
Шестакова А.А., Торговкин Я.И., Васильев Н.Ф., Башарин Н.И., Никифорова Н.Н., Калиничева С.В., Ефремова В.А., Новоприезжая В.А. Новая геокриологическая карта Якутии масштаба 1:1 500 000	97
СЕКЦИЯ 2. ТЕПЛОВОЕ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В КРИОЛИТОЗОНЕ. ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ИЗЫСКАНИЙ НА СЕВЕРЕ	
Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М., Шиленкова В.С. Неразрушающий сейсмометрический способ определения упругих характеристик грунтов железнодорожной насыпи	101
Горбунова А.А. Новый способ использования высокотемпературных многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований одноэтажных зданий	104
Деревцов А.С., Никифоров А.Я. Оценка влияния температурного режима подполья на многолетнемерзлые грунты на примере зданий г. Якутска	105
Кузьмин Г.П. Использование природных тепловых ресурсов	109
Кузьмин Г.П., Куваев В.А. Отопление помещений водой	112
Кузьмин Г.П., Набережный А.Д. Теплотехнический способ защиты свайных фундаментов от морозного пучения	114
Локтионов Е.Ю., Шараборова Е.С., Клоков А.В., Тутунин А.С. Новые способы термостабилизации многолетнемерзлых грунтов с использованием возобновляемых источников энергии	117
Лоскин М.И. Устойчивость гидромелиоративных объектов Республики Саха (Якутия) в условиях изменения климата	120
Малышков С.Ю., Гордеев В.Ф., Поливач В.И. Метод естественного импульсного электромагнитного поля земли для инженерных изысканий в условиях Крайнего Севера	122
Мельников В.П., Молокитина Н.С., Горелик Я.Б., Земеров И.В., Хабитов А.Х., Железняк М.Н., Чжан Р.В., Набережный А.Д., Заболотник П.С., Чжан А.А., Башкова А.А., Шейн А.Н. Обеспечение надежности инженерных сооружений в Арктике при современных климатических изменениях	126

Местников В.В., Местникова И.В. Комбинированный способ устройства свайных фундаментов в криолитозоне	129
Попов С.Н., Федоров Ю.Ю., Буренина О.Н., Ксенофонтов П.В. Конструкции защитных футляров для подземных газопроводов	133
Попов С.Н., Буренина О.Н., Андреева А.В., Саввинова М.Е., Соловьев Т.М. Устройство для измерения касательных сил морозного пучения в лабораторных условиях	136
Пугач В.Н. Автоматизированные системы мониторинга температуры вечномерзлых грунтов производства АО «НПП "ЭТАЛОН"»	138
Ряховских И.В., Трифонов О.В. Цифровая платформа управления целостностью трубопроводов	141
Сазонов П.М., Алексеев А.Г. Актуальные вопросы проектирования фундаментов на многолетнемерзлых грунтах	145
Сыромятников И.И., Кириллин А.Р., Литовко А.В., Жирков А.Ф., Железняк М.Н. Организация мониторинговых площадок на автомобильных дорогах в криолитозоне	148
Трифонов О.В., Ряховских И.В., Ефимов В.М., Большев К.Н. Расчетное прогнозирование термомеханического взаимодействия подземных газопроводов с грунтовой средой в криолитозоне	151
Филимонов А.А. Анализ результатов теплового моделирования подземных линейных трубопроводов в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов	154
Чжан А.А., Заболотник П.С., Чжан Р.В., Чжан Т.Р., Набережный А.Д. Особенности формирования температурного режима грунтов основания здания с высоким проветриваемым подпольем (на примере Республиканской больницы № 1)	157
Чжан Р.В., Якимов А.А., Чжан А.А. Современное состояние ограждающей дамбы г. Якутска на участке № 3	160
Чуржакова Д.В. Исследование влияния снеготаноса в проветриваемом подполье на температурный режим грунтов основания сооружений	163
Шарков А.А., Прокопюк И.В. Автоматизированные системы термометрии грунтов	166
Якимов А.А., Ефремов В.Н., Христофоров И.И., Данилов К.П. Мерзлотные условия участка эксплуатации гидроузла на реке Матта по данным электроразведки	169
СЕКЦИЯ 3. УСТОЙЧИВОСТЬ МЕРЗЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ. КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ. КРИОЛИТОЗОНА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ	
Алексеев А.Г. Криогенное пучение органоминеральных грунтов	173

Бадмаев Н.Б., Куликов А.И. О феномене «осенней засухи» и континентальности почвенного климата на южной границе криолитозоны Забайкалья	176
Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Устойчивость мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии к потеплению климата	179
Васильев А.И. Современное состояние ландшафтов водосборного бассейна реки Анмангында	182
Ефремов П.В., Башарин Н.И. Состояние пахотных земель по данным геокриологического мониторинга в Лено-Амгинском междуречье	186
Жирков А.Ф., Сивцев М.А. Восстановление и защита разрушенных территорий с сильнольдистыми отложениями в условиях Центральной Якутии	189
Конечная Я.В., Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Морозова Е.Р. Влияние экзогенных и эндогенных факторов на сейсмичность ледовых куполов (арх. Северная Земля)	192
Константинов П.Я., Федоров А.Н., Башарин Н.И., Угаров И.С., Петров М.И., Кондаков А.П. Влияние зимних условий на межгодовую изменчивость глубины сезонного протаивания	195
Корсунова Ц.Д.-Ц., Чимитдоржиева Э.О., Чимитдоржиева Г.Д. Углерод микробной биомассы в почвах бугров пучения и термокарстовых понижений юга Витимского плоскогорья	198
Макарьева О.М., Землянскова А.А., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Алексеев В.Р. Факторы многолетней изменчивости наледей подземных вод северо-востока России на примере Анмангындиной наледи	200
Малкова Г.В., Дроздов Д.С., Васильев А.А., Пономарева О.Е., Гравис А.Г. Температурный режим и чувствительность мерзлых толщ в условиях современного потепления климата	203
Николаева Е.С., Фролов Д.М., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А. Исследование пространственно-временной неоднородности снежной толщи на площадке МО МГУ зимой 2022/2023 гг.	206
Пермяков П.П., Попов Г.Г., Винокурова Т.А., Жирков А.Ф., Аммосов Г.С., Иванов Дж.С. Прогнозирование размыва берегов северных рек в условиях изменения климата	209
Петров М.И. Феноменальная пожарная активность в центральной части Республики Саха (Якутия) и метеорологические условия в июне 2021 г.	212
Петрова А.Н., Ноев И.И., Филиппов Д.В. Метеорологические наблюдения на опытной площадке испытательного полигона СВФУ	215
Петрова А.Н. Изменение некоторых метеорологических характеристик теплого периода в западных районах Республики Саха (Якутия)	218

Самсонова В.В. Прогнозная оценка мерзлотно-климатической динамики маревых ландшафтов Амурской области	221
Торговкин Н.В., Сивцев Д.Е., Лыхота Н.И., Спектор В.В. Новая локальная линия метеорных вод Якутска	224
Трифонов Б.А., Милановский С.Ю., Великин С.А., Истратов В.А. Сейсмические воздействия на мерзлоте	227
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	230
Хрусталева Л.Н. Два инновационных предложения по освоению Арктического шельфа	233
Jin H., Li X., Jin X. Impacts of forest fires on the permafrost environment in the Da Xing'anling Mountains, Northeast China	235
Niyama T., Park H., Sato T., Lebedeva L., Fedorov A. Drastic changes of water cycle under current climate warming in Eastern Siberia.....	237