

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет
Звенигородская биостанция

«ДЕНЬ НАУКИ 2020»

Материалы 5-ой конференции

22–23 января 2020 года

УДК 55
ББК 26.3
Д34

Д34 Материалы 5-ой конференции «День науки 2020», [электронное издание сетевого распространения]. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2020. – 121 с. – URL: <https://bookonline.ru/node/4733>. – doi: 10.31453/kdu.ru.91304.0105.

ISBN 978-5-7913-1126-9

Издательство «КДУ»: 8(495) 638-57-34. www.kdu.ru

ISBN 978-5-7913-1126-9

© «КДУ», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

HERBARIUM PERMICUM. ПОЛЕВОЙ АТЛАС-ОПРЕДЕЛИТЕЛЬ ПЕРМСКИХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ ПО РАЙОНУ ПРОХОЖДЕНИЯ ВОРКУТИНСКОЙ УЧЕБНО-НАУЧНОЙ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

Наугольных С.В.¹, Кирилишина Е.М.², Исаев В.С.³

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия; naugolnykh@list.ru

^{2,3}Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

²conodont@mail.ru; ³tpomed@rambler.ru

ВЛИЯНИЕ ГАЗОВОЙ КОМПОНЕНТЫ НА СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ДИНАМИКА ЕЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Р.Г. Кальбергенов¹; Ф.С. Карпенко¹; Кутергин В.Н.¹, Р.В. Собин²,

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), лаборатория грунтоведения и механики грунтов

²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

РАЗРАБОТКА МАРСИАНСКОГО ГРУНТА-АНАЛОГА ДЛЯ ОТРАБОТКИ БРОСКОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОСАДОЧНОГО АППАРАТА «ЭКЗОМАРС-2020»

Гришакина Е.А.¹, Маковчук В.Ю.¹, Дмитровский А.А.¹, Сорокин Е.М.¹, Уварова А.В.^{1,2}, Слюта Е.Н.¹, Вознесенский Е.А.², Никитин М.С.², Сенцова Е.А.²

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), Москва, Россия; orskaty@mail.ru

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия; NikitinMS@geol.msu.ru

ДЛИТЕЛЬНОВРЕМЕННОЙ МОНИТОРИНГ В ЮЖНОЙ ТУНДРЕ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ГЕОСИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ НАУЧНО-УЧЕБНОГО ПОЛИГОНА ХАНОВЕЙ)

Безделова А.П.¹, Исаев В.С.², Сергеев Д.О.³

¹Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А.Израэля, abezdelova@mail.ru

²Геологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, кафедра геокриологии, tpomedd@yandex.ru

³Институт геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН, Москва, Россия; sergueevdo@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО УРОВНЯ КАРСКОГО МОРЯ В ПОСЛЕДНИКОВОЕ ВРЕМЯ

Баранская А.В.¹

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия; alisa.baranskaya@yandex.ru

ИТОГИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ЧАРЕ 2005–2019 г.г.: СОСТОЯНИЕ И ДИНАМИКА ГОРНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Сергеев Д.О.¹

¹Институт геоэкологии РАН, Москва, Россия; sergueevdo@mail.ru

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЙ СУБАКВАЛЬНОГО КРАСНОЯРСКОГО ОПОЛЗНЯ (ОЗ. БАЙКАЛ)

А.А. Кудаев¹

¹Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова; <http://oilmsu.ru/>

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Д. Кривов¹; Ф. Шевчик²,

¹ ООО РУСГЕОТЕХ, г. Москва, <https://www.rgtekh.ru/about.html>

² Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; (<https://www.rgtekh.ru/about.html>)

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ И ВЕЛИЧИНА СЕЗОННОГО ПУЧЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЗВЕНИГОРОДСКОЙ БИОСТАНЦИИ МГУ

А.В. Уварова¹, И.А. Комаров¹, Исаев В.С.¹ А.И. Тюрин¹

¹Геологический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛАВИНЫ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ С СУБТРОПИЧЕСКИМ КЛИМАТОМ

Турчинская О.И.¹

¹Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; olgaturch@yandex.ru

ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ МЕРЗЛЫХ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Р.Г. Кальбергенов¹; И. Агапкин¹,

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), лаборатория грунтоведения и механики грунтов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ АБРАЗИОННО-ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ СЕВАСТОПОЛЯ

Исаев В.С.¹, Игнатов Е.И.¹, Новиков А.А.², Каширина Е.С.², Трачук В.²

Аманжуров Р.М.¹, Горшков Е.И.¹, Вербовский В.В.³

¹Геологический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова

²Факультет естественных наук кафедра геоэкологии и природопользования филиала МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Севастополь. <https://sev.msu.ru/otdelenie-geografiya/>

³ ООО «АртГео»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛОГО ГРУНТА СТАТИЧЕСКИМ ЗОНДИРОВАНИЕМ

Соколов И.С.¹, Лагоша Д.В.², Волков Н.Г.¹, Исаев В.С.²

¹ООО «ГЕОИНЖСЕВИС» (международная группа компаний Фугро), Москва, Россия; ssi@fugro.ru

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия; tromed@rambler.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ТЕРМОАБРАЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УРАЛЬСКОМ БЕРЕГУ БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ

Аманжуров Р.М.¹, Исаев В.С.¹, Горшков Е.И.¹, Сибирякова А.И.¹, Шевчук Я.О.¹

¹Геологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, кафедра геокриологии

ПЕРВИЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ

Болотюк М.М.¹, Комаров И.А.¹, Исаев В.С.¹, Кальбергенов Р.Г.², Карпенко Ф.Ф.²

¹Кафедра геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова; ²Институт геоэкологии РАН, Москва, Россия;

**HERBARIUM PERMICUM. ПОЛЕВОЙ АТЛАС-ОПРЕДЕЛИТЕЛЬ
ПЕРМСКИХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ ПО РАЙОНУ ПРОХОЖДЕНИЯ
ВОРКУТИНСКОЙ УЧЕБНО-НАУЧНОЙ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЙ
ПРАКТИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ ИМЕНИ М.В.
ЛОМОНОСОВА**

Наугольных С.В.¹, Кирилишина Е.М.², Исаев В.С.³

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия; *naugolnykh@list.ru*

^{2,3}Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия;

²conodont@mail.ru; ³tpomed@rambler.ru

Представлен результат совместной работы сотрудников Геологического института РАН, Музея землеведения и кафедры геокриологии Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Это учебное пособие по полевому определению пермских ископаемых растений, часто встречающихся в Печорском угольном бассейне и нередко связанных с угленосными фациями. Атлас включает фотоизображения, прорисовки и реконструкции ископаемых растительных остатков плауновидных, хвощевидных, папоротниковидных и голосеменных растений. В заключительной части книги приведен обширный список рекомендуемой литературы, посвященной различным аспектам палеоботаники и стратиграфии пермской системы.

**HERBARIUM PERMICUM. FIELD ATLAS FOR IDENTIFICATION OF PERMIAN
PLANT MACROFOSSILS ON THE AREA OF VORKUTA ENGINEER-
GEOCRYOLOGICAL SCIENTIFIC-EDUCATIONAL FIELD WORK (THE LOMONOSOV
MOSCOW STATE UNIVERSITY, GEOLOGICAL FACULTY)**

Naugolnykh S.V.¹, Kirilishina E.M.², Isaev V.S.³

¹Geological Institute RAS, Moscow, Russia; *naugolnykh@list.ru*

^{2,3}Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ²conodont@mail.ru; ³
tpomed@rambler.ru

The collaborative results of the researchers of the Geological Institute of RAS, the Geocryology Department (Geological faculty) and the Earth Science Museum at the Lomonosov Moscow State University are presented. The book is focused on the educational aims of the field determination of the Permian fossil plants, which are often found in the Pechora coal basin and are frequently linked with the coal-bearing deposits. The atlas includes photographs, drawings and reconstructions of the fossil plants, which belong to the divisions Lycopodiophyta, Equisetophyta, Polypodiophyta (=Filicophyta), and gymnosperms (divisions Pteridospermatophyta (=Lyginopteridophyta), Ginkgophyta, Pinophyta). An extensive list of the recommended bibliographical sources is given in the final part of the book.

В рамках Воркутинской учебно-научной и производственной инженерно-геокриологической практики кафедры геокриологии Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова ее участники посещают ряд классических разрезов Печорского угольного бассейна. Это обнажения на левом берегу р. Воркута, сложенные ниже- и среднепермскими отложениями, обогащенными ископаемыми растительными остатками. К настоящему времени собрана представительная коллекция этих растительных остатков. Она передана в Музей землеведения МГУ имени М.В. Ломоносова [1-4].

При детальном изучении коллекции оказалось, что в ней присутствуют образцы, представляющие музейную и научную ценность, и по этим материалам в музее монтируется выставка «Палеоботанические материалы Воркутинской инженерно-геокриологической практики Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова». Выставка задумана, в первую очередь, для студентов естественнонаучных факультетов (геологического, географического, биологического, почвоведения) как наглядное подспорье при знакомстве с геологией и географией большеземельской тундры. Кроме того, выставка в таком формате востребована смежниками из изыскательских и эксплуатационных организаций, работающих в этих районах исследований. Отдельные экспонаты выставки используются в общей просветительской работе музея, во время проведения обзорных и тематических экскурсий, а также в учебном процессе, на занятиях со студентами и школьниками.

Палеоботанические сборы представителей кафедры геокриологии в этом районе продолжают, однако, несмотря на массовость материала с территории Печорского угольного бассейна, в распоряжении полевых исследователей практически нет атласов-определителей, с помощью которых геологи и краеведы, работающие в пределах Европейской части России, могли бы в общем плане сориентироваться в отношении

таксономической принадлежности найденного растения. Именно поэтому возникла необходимость в подготовке рабочего определительского каталога находимых растительных остатков. Предлагаемое издание составлено по материалам указанных выше сборов с привлечением дополнительных материалов из пермских отложений Печорского угольного бассейна и Приуралья [5], рис. 1.

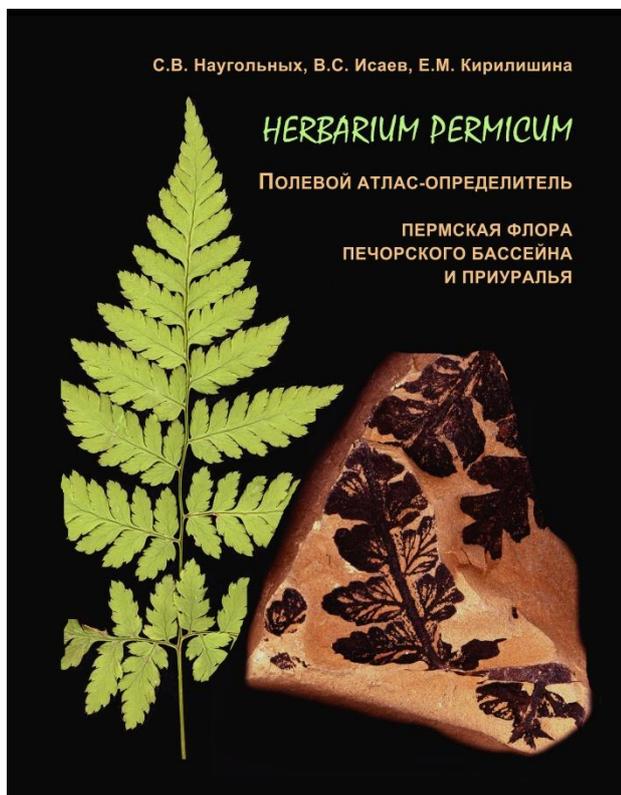


Рис. 1. Обложка атласа-определителя пермских растений Печорского бассейна и Приуралья [5]

Атлас предназначен для предварительного определения ископаемых растений в ходе полевых исследований. Для упрощения работы с атласом в нем размещены изображения наиболее часто встречаемых в Печорском угольном бассейне таксонов. При этом для каждой крупной группы растений приведены и фотоизображения, и прорисовки, позволяющие увидеть важные при определении растений детали морфологии. В целях максимальной наглядности были отобраны те образцы ископаемых растений, которые демонстрируют оптимальное сочетание признаков, характерных для того или иного таксона. Чтобы облегчить дальнейшую работу с ископаемыми остатками, в заключительной части работы приведен обширный библиографический список работ,

рекомендованных для дальнейшей работы с собранными палеоботаническими коллекциями.

Работа выполнена при поддержке Российско-Норвежского образовательного гранта RuNoCORE CPRU-2017/10015, а также в рамках темы госзадания № 0135-2019-0044 «Фитостратиграфия, палеофлористика, кризисные события кайнозоя, мезозоя и палеозоя различных регионов Евразии, палеоклиматические, палеофитоценотические и палеофитогеографические реконструкции» Геологического института РАН, темы АААА-А16-116033010094-4 «Теоретические основы геокриологического прогноза и картирования криолитозоны России» кафедры геокриологии Геологического факультета Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова, темы АААА-А16-116042010088-5 «Эволюция геодинамических обстановок и глобальные природные процессы» Музея землеведения Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова. Авторы выражают искреннюю признательность С.К. Пухонто (Государственный Геологический музей имени В.И. Вернадского РАН, г. Москва) за предоставленные для изучения ископаемые остатки растений из пермских отложений Печорского угольного бассейна и Приуралья.

Литература

1. Кирилишина Е.М., Исаев В.С., Кошурников А.В. и др. Палеонтологические материалы Воркутинской инженерно-геокриологической практики геологического факультета МГУ // Жизнь Земли. — 2017. — Т. 39, № 3. — С. 278–286.
2. Кирилишина Е.М., Наугольных С.В., Исаев В.С. Новые поступления пермских ископаемых растений на временной выставке в Музее землеведения МГУ // Наука в вузовском музее: Материалы Всероссийской научной конференции (Москва, 14-16 ноября 2017 г.). Часть 1. — Музей землеведения МГУ Москва, 2017. — С. 29–30.
3. Наугольных С.В., Исаев В.С., Кирилишина Е.М. Пермские ископаемые растения из отложений воркутской серии Печорского угольного бассейна в коллекции Музея землеведения МГУ им. М.В. Ломоносова // Вестник Московского Государственного университета. Сер. 4. Геология. 2018. С. 42-51.
4. Наугольных С.В., Кирилишина Е.М., Исаев В.С. Систематическое положение и морфология пермского папоротника *resopteris helenaeanae zalesky* (по материалам изучения новой музейной коллекции) // Жизнь Земли. — 2018. — Т. 40, № 3. — С. 335–341.

5. Наугольных С.В., Исаев В.С., Кирилишина Е.М. HERBARIUM PERMICUM. Полевой атлас-определитель. Пермская флора Печорского бассейна и Приуралья. Москва. 2020. 70 с. Препринт. DOI: [10.13140/RG.2.2.20853.93925](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20853.93925).

ВЛИЯНИЕ ГАЗОВОЙ КОМПОНЕНТЫ НА СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ДИНАМИКА ЕЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Р.Г. Кальбергенов¹, Ф.С. Карпенко¹, Кутергин В.Н.¹, Р.В. Собин²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), лаборатория
грунтоведения и механики грунтов;

² Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

При освоении арктического региона происходит увеличение интенсивности геокриологических процессов. Эти процессы оказывают негативное влияние на экологию, условия проживания людей, а также на производственные объекты. Одним из таких процессов является выделение газовой составляющей из мерзлых грунтов. Результатом газовыделения являются участвовавшие в последнее время взрывные процессы, сопровождающиеся разбросом грунта и формированием воронок. Поэтому проблема активизации геокриологических процессов и выделения газовой составляющей из мерзлых грунтов под влиянием инженерно-хозяйственной деятельности человека, а также общего изменения климата, требует всестороннего изучения.

THE EFFECT OF THE GAS COMPONENT ON THE PROPERTIES OF FROZEN SOILS AND THE DYNAMICS OF ITS EVOLUTION WITH TEMPERATURE

R.G. Kalbergenov¹; F.S. Karpenko¹; V.N. Kutergin¹, R.V. Sobin²,

¹ Sergeev Institute of Environmental RAS, Moscow, Russia;

² Lomonosov Moscow State University, Russia, e-mail: rsobin@yandex.ru;

During the development of the Arctic region there is an increase in the intensity of permafrost processes. These processes have a negative impact on the environment, living conditions of people, as well as on production facilities. One of these processes is the release of the gas component from frozen soils. As a result of gas release, explosive processes that have become more frequent in recent years are accompanied by soil dispersion and the formation of craters. Therefore, the problem of activation of geocryological processes and isolation of the gas component from frozen soils under the influence of human engineering and economic activity, as well as General climate change, requires a comprehensive study.

Масштабное освоение арктического региона инициирует и активизирует различные геокриологические процессы и явления. Они оказывают негативное влияние на экологическую обстановку, условия проживания людей и производственные объекты. Проблема активизации геокриологических процессов под влиянием инженерно-хозяйственной деятельности человека, а также общего изменения климата, требует всестороннего изучения.

Общеизвестно, что многолетнемерзлые грунты арктических районов являются многокомпонентными системами, в которых помимо минерального скелета, могут находиться лед, вода в жидком состоянии (незамерзшая вода), растворенные соли и газовые включения. Каждый из компонентов является важным элементом структур грунтов, во многом определяющим их свойства. Все компоненты и их влияние на свойства грунтов всесторонне изучаются. Однако, как для талых, так и для мерзлых грунтов закономерности влияния содержания газовой составляющей и особенности ее взаимодействия с твердой и жидкой фазами грунта остаются недостаточно изученными.

Многолетнемерзлые грунты традиционно рассматриваются как относительно стабильные образования, сложенные в основном минеральными частицами, дополнительно сцементированными льдом при замерзании. Общепринято считать, что изменение свойств мерзлых грунтов происходит при переходе из мерзлого фазового состояния в талое. В интервалах температур ниже температур замерзания–оттаивания свойства мерзлых грунтов считаются практически неизменными. Такой подход определяет направления исследований свойств мерзлых грунтов при инженерно-геологических изысканиях – испытания проводятся в условиях сохранения естественной температуры и при оттаивании.

В то же время накоплено множество фактов, показывающих, что такой подход не всегда позволяет дать полную характеристику свойств мерзлых грунтов и достоверно

обосновать прогноз их изменения при строительстве и эксплуатации сооружений. Особенно актуальным это становится в настоящее время, характеризующееся изменением геокриологических условий в результате климатических изменений и возрастающих техногенных нагрузок при активизации хозяйственной деятельности в арктическом регионе.

При изменении природных условий под действием внешних факторов, в первую очередь, изменений температуры и напряженного состояния, «законсервированные» в мерзлом состоянии газовые включения, могут приобрести решающую роль в формировании несущей способности оснований сооружений. Глобальные изменения геокриологических условий, происходящие в настоящее время, приводят к активизации процессов выделений заключенных в мерзлых грунтах газов. Результатом растепления грунтов и газовой выделения являются участвовавшие в последнее время взрывные процессы, сопровождающиеся разбросом грунта и формированием воронок или кратеров (наиболее известный – "Ямальский кратер"), обрушения берегов и склонов, солифлюкционные и другие процессы и явления.

Эти процессы являются важнейшими факторами риска и вносят дополнительные сложности для проектирования и эксплуатации инженерных сооружений, поэтому исследование газовой составляющей и ее роли в поведении мерзлых грунтов при оттаивании очень важно. Для того чтобы разобраться в данном вопросе и понять природу этих процессов авторы провели ряд исследований, которые помогли раскрыть основные закономерности влияния газовой составляющей на свойства мерзлых грунтов.

Были выполнены экспериментальные исследования, которые позволили оценить объемы и величину давления выделившихся газов, физические свойства грунтов и их механические свойства (деформируемость, прочность) при различных температурах и напряженных состояниях.

Исследование влияния газовых включений на прочностные свойства мерзлых грунтов проводились методом недренированного сдвига в соответствии со стандартом ИГЭ РАН СТО 93.020-2013/7 «Лабораторные испытания дисперсных грунтов методом недренированного одноплоскостного среза с замером порового давления».

В качестве объекта исследований были использованы образцы мерзлых суглинистых грунтов активно осваиваемого берега Байдарацкой губы, строение которого типично для толщ многолетнемерзлых грунтов севера Западной Сибири. По данным полевых и лабораторных исследований данных грунтов было установлено широкое распространение

внутримерзлотных газовых скоплений, имеющих преимущественно биохимический генезис.

Характерной особенностью грунтов является неполная водо-(льдо)насыщенность - коэффициент водонасыщения для суглинков составляет 0.91–0.97, то есть все эти грунты содержат в своем составе газовую компоненту. Температура начала замерзания – оттаивания для суглинков равна -3°C .

Оценка реакции газосодержащих мерзлых грунтов на возможные изменения геокриологических условий основана на результатах исследований динамики газовыделения в них при изменении термобарических условий (изменении температуры и напряженного состояния). Газовыделение в грунтах исследовалось в диапазоне температур от -10°C до $+20^{\circ}\text{C}$, с шагом изменения температур один градус. Диапазон температур был выбран на основе данных многолетних наблюдений [7]. Испытания проводились в условиях свободного газовыделения, при отсутствии сжимающих нагрузок, и под действием объемного сжимающего давления величиной в 0.05, 0.1 и 0.2 МПа.

Результаты исследований графически представлены на рис. 1 – 3.

На рис. 1 показана зависимость удельного объема выделившегося газа от температуры для суглинков при изменении напряженного состояния грунта. Свободное газовыделение при отсутствии внешних сжимающих нагрузок в глинистых грунтах начинается при -5°C , пик наступает при отрицательных температурах -2°C , затем интенсивность газовыделения сокращается до полного прекращения выделения газовой компоненты при $+4^{\circ}\text{C}$.

Характер выделения газов в грунтах зависит от их напряженного состояния. Под действием сжимающих нагрузок снижается температура начала газовыделения, также меняется динамика этого процесса, при этом общий удельный объем выделяющихся газов остается неизменным.

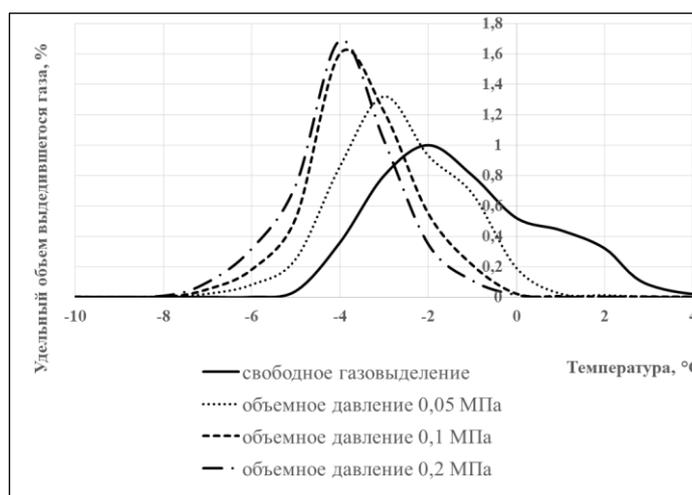


Рисунок 1 – Зависимость удельного объема выделившегося газа от температуры для суглинков при изменении напряженного состояния грунта

Выделения газов в мерзлых грунтах приводит к закономерному изменению их строения. В результате газовыделения, при росте температуры под действием сжимающих нагрузок происходит увеличение плотности и степени водо-(льдо)насыщения и снижение пористости грунтов.

Изменение строения мерзлых грунтов происходит в соответствии с динамикой выделения газов в них. Характер изменения строения суглинков зависит от температуры и напряженного состояния. Интенсивность процесса увеличивается с ростом температуры и увеличением сжимающего давления. Этот фактор необходимо учитывать при планировании хозяйственной деятельности, так как в реальных условиях эти процессы могут приводить к просадкам грунтов и связанных с ними деформациями сооружений.

Изменение строения мерзлых грунтов в результате газовыделения в них вызывает изменение их механических свойств, деформируемости и прочности.

Полученные данные показывают, что газовыделение в мерзлых грунтах при повышении температуры приводит к снижению показателей их деформационных и прочностных свойств, так называемой деградации свойств, при этом характер и интенсивность этого процесса зависит от напряженного состояния, в котором находится грунт.

В условиях свободного газовыделения происходит закономерное снижение прочности суглинков (рис. 2,3), соответствующее изменениям их строения. Снижение прочности грунтов начинается при повышении их температуры до -5°C , при которой начинается процесс газовыделения.

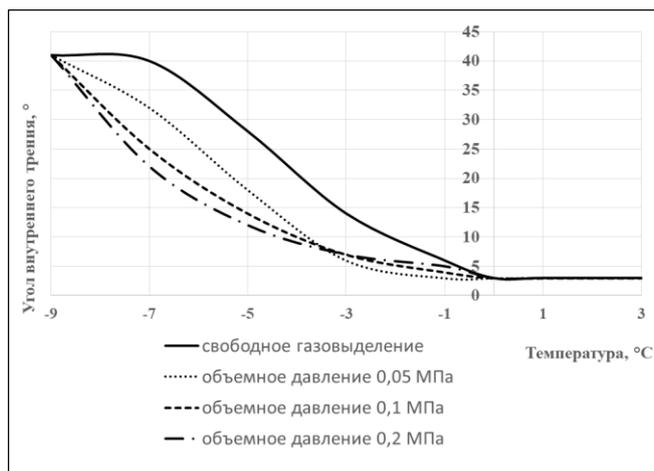


Рисунок 2 – Изменение прочности (угла внутреннего трения) суглинков при газовой выделении

При дальнейшем увеличении температуры интенсивность деградации прочностных свойств нарастает, и при температурах $-2-3^{\circ}\text{C}$ для суглинков, при которых активность процесса выделения газов достигает своего максимума, величины показателей прочностных свойств, угла внутреннего трения φ и сцепления C , снижаются до минимальных значений.

Приведенные результаты показывают, что газовой выделение из мерзлых грунтов в условиях свободного оттаивания без нагрузки приводит к разуплотнению и соответствующему снижению прочности мерзлых грунтов и их практическому разупрочнению при достижении температуры $+3^{\circ}\text{C}$ и выше.

В условиях действия сжимающих нагрузок газовой выделение и вызванное им изменение строения мерзлых грунтов начинаются при более низких температурах и имеют отличный, по сравнению со свободным газовой выделением, характер протекания. Важной их особенностью является то, что при газовой выделении под действием нагрузок при отрицательных температурах, ниже температур замерзания–оттаивания, происходит уплотнение грунтов, снижение их пористости. Изменение механических свойств грунтов в этих условиях происходит в полном соответствии с динамикой газовой выделении и изменения их строения.

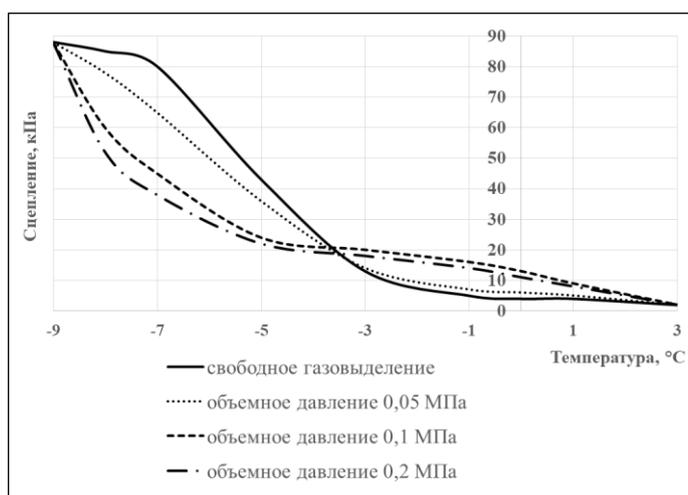


Рисунок 3 – Изменение прочности (сцепления) суглинков при газовой выделении

Наиболее интенсивное снижение показателей деформационных свойств грунтов (модуля деформации) при газовой выделении под действием сжимающих нагрузок происходит в диапазоне температур от -7°C до -4°C , при дальнейшем повышении температуры снижение величины модуля деформации происходит более равномерно и плавно. Величина модуля деформации при одной и той же температуре зависит от величины сжимающего давления, при котором происходит газовыделение, что вызвано тем, что при больших давлениях происходит более интенсивное уплотнение грунта.

Характер изменения прочностных свойств грунтов так же определяется динамикой газовой выделения и изменения их строения. Под действием нагрузок снижение величины угла внутреннего трения и сцепления начинается при температурах от -8°C до -7°C и наиболее активно протекает до температуры -5°C , при этом интенсивность деградации прочности зависит от величины сжимающей нагрузки. Степень снижения величины угла внутреннего трения понижается, а сцепления – увеличивается при увеличении объемного давления на грунт. Повышение температуры и выделение газовых включений в этих условиях приводит к дальнейшей деградации прочности грунтов, но динамика этого процесса имеет сложный неравномерный характер.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что наличие газовых включений оказывает существенное влияние на строение и свойства мерзлых грунтов при изменении геокриологических условий. Повышение температуры грунтов инициирует начало выделение газов в них, причем этот процесс начинается и наиболее активно протекает уже при незначительных изменениях температуры, не превышающих температуры

замерзания–оттаивания, в условиях, при которых грунт в целом остается в мерзлом фазовом состоянии, характерном для современного состояния криолитозоны. Газовыделение в мерзлых грунтах приводит к закономерному изменению их строения и деградации прочностных и деформационных свойств. Характер и динамика таких изменений зависят как от внешних условий, температуры и напряженного состояния грунта, так и от его состава, внутреннего строения и свойств.

Подводя итог сказанному, можно отметить, что выполненные исследования позволяют дать оценку и прогноз поведения грунта в результате изменения геокриологических условий и напряженного состояния. Для предотвращения дополнительных деформаций сооружений и обеспечения экологической безопасности полученные данные необходимо обязательно учитывать при проектировании сооружений.

Литература

1. Sergeev D., Khimenkov A., Tipenko G., Vlasov A., Cauquil E., Green E., Dauboin P., Stanilovskaya J., Mnushkin M. Yamal Craters: State of Knowledge and Wished In-situ Investigations. XI. International Conference on Permafrost 20 – 24 June 2016. Potsdam. Germany p. 997.
2. Богоявленский В.И. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал // Бурение и нефть. №7-8 (163-164) июль-август 2015. с. 8-13.
3. Якушев В.С. Состав, строение и свойства мерзлых гидратонасыщенных отложений. Дисс.на соискание звания канд. г.-м. н. М. МГУ. 1991. 132 с.
4. Чувиллин Е.М., Перлова Е.В., Дубиняк Д.В. Экспериментальное моделирование условий существования газовых гидратов в морских отложениях п-ова Ямал. В сб. Материалы Второй конференции геокриологов России, т. 1. М. 2001. с. 169-173.
5. Ривкин Ф.М. О распределении метана в мерзлых породах на территории Бованенковского газоконденсатного месторождения на полуострове Ямал. В сб.: «Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике», Новосибирск: Наука, 1997. с. 168-173.
6. Перлова Е.В. Особенности газосодержания многолетнемерзлых пород на примере северо-западной части п-ва Ямал, Дисс.на соискание звания канд. г.-м. н. М., МГУ, 2001. 178 с.

7. Vladislav Isaev, Andrey Koshurnikov, Andrey Pogorelov, Ruslan Amangurov, Oleg Podchasov, Dmytry Sergeev, Arata Kioka. Field investigation and laboratory analyses; Baydaratskaya bay. 2016. с. 14 - 17.

www.researchgate.net/publication/321070966_Field_investigation_and_laboratory_analyses_Baydaratskaya_bay_2016

РАЗРАБОТКА МАРСИАНСКОГО ГРУНТА-АНАЛОГА ДЛЯ БРОСКОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОСАДОЧНОГО АППАРАТА «ЭКЗОМАРС-2020»

Гришакина Е.А.¹, Маковчук В.Ю.¹, Дмитровский А.А.¹, Сорокин Е.М.¹, Уварова А.В.^{1,2}, Слюта Е.Н.¹, Иванов М.А.¹, Вознесенский Е.А.², Никитин М.С.², Сенцова Е.А.²

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), Москва, Россия; *orskatya@mail.ru*

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия;
NikitinMS@geol.msu.ru

Для отработки бросковых испытаний посадочного аппарата «ЭкзоМарс-2020» создан грунт-аналог, имитирующий физико-механические свойства марсианского реголита в потенциальном месте посадки, Oxia Planum. На этом плато выделен ряд типов местности, каждый из которых характеризуется геоморфологическими особенностями, механическими свойствами приповерхностного грунта. В соответствии с распределением компонент грунта, отличающихся по гранулометрическому составу и плотности, на основе расчётных методов был разработан марсианский грунт-аналог.

DEVELOPMENT OF THE MARTIAN SOIL IMITATOR FOR DROP TESTS OF THE «EXOMARS 2020» LANDING MODULE

Grishakina E.A.¹, Makovchuk V.Yu.¹, Dmitrovsky A.A.¹, Sorokin E.M.¹, Uvarova A.V.^{1,2}, Slyuta E.N.¹, Ivanov M.A.¹, Voznesensky E.A.², Nikitin M.S.², Sentsova E.A.²

¹Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAS), Moscow, Russia; *orskatya@mail.ru*

²Lomonosov MSU, department of Geology, Moscow, Russia; *NikitinMS@geol.msu.ru*

To conduct the drop tests of the ExoMars-2020 lander module, an imitator of Martian soil that simulates the physical and mechanical properties of the Martian regolith at a potential landing site, on the Oxia Planum was created. A number of terrain types have been identified on this plateau, each of which is characterized by geomorphological features and the mechanical properties of the surface soil. Then, Martian soil imitator was developed on the basis of calculation methods in accordance with the distribution of soil components that differ in particle size distribution and density.

Введение

Широкий интерес к приповерхностному веществу Марса привел к необходимости создания грунтов-аналогов при подготовке посадочных миссий, в том числе для российско-европейского проекта ЭкзоМарс [1]. Геолого-морфологический анализ поверхности показывает, что в пределах эллипса потенциального места посадки, Oxia Planum, около десятка типов грунта [2]. Неоднородность грунта и, как следствие, физико-механических свойств в потенциальном месте посадки спускаемого модуля делает задачу подготовки миссии нетривиальной. Учитывая масштабность проводимых испытаний, объемы замешиваемого грунта-аналога и вместе с тем ограниченное финансирование, чтобы сделать разработку актуальной, приходится отказаться от дорогостоящих материалов в сторону упрощения и удешевления грунта-аналога. В данной работе мы рассмотрим, какие материалы предлагаются нами для смеси аналога грунта, подтвердим в ходе лабораторных испытаний подобие аналогов и марсианского грунта по физико-механическим свойствам и рекомендуем наиболее подходящий грунт-аналог для широкомасштабных натурных экспериментальных исследований, в том числе для бросковых испытаний спускаемого модуля.

Инженерно-геологическая характеристика места посадки «ЭкзоМарс-2020»

Эллипсом посадки «ЭкзоМарс-2020» был выбран район Oxia Planum (плато Оксия). Общая топографическая конфигурация района Oxia Planum составляется двумя главными провинциями, низменными равнинами и приподнятой материковой местностью. Главными топографическими деталями на равнине являются пологие холмы и реликты ударных кратеров, на материке – депрессии флювиальных русел Coogoon Valles и

грубообломочные выбросы крупного кратера. По цифровым моделям рельефа MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) и HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) обнаружено, что местность характеризуется преимущественно малыми уклонами поверхности [2], благоприятными для посадки.

Расположенный на низких широтах Марса район Oxia Planum покрыт чехлом марсианского реголита, в данном случае морозным иссушенным грунтом, мощность которого может достигать 300 м. На основе анализа снимков CTX (Context Camera) и HiRISE с привлечением данных с места работы спускаемых аппаратов для района Oxia Planum выделены 10 типов геоморфологических подразделений и представлены оценки количества пылевой, песчаной, каменистой и глинистой компонент грунта (таблица 1).

Таблица 1 – Модельный состав грунта геоморфологических подразделений в районе Oxia Planum

Подразделение	Индекс	Компонент грунта, объемный %			
		Пыль	Песок	Камни	Глины
Свежие выбросы	ejd		70	30	
Светлые покровы	bem	30	40	10	20
Светлые равнины	lbr	10	80	5	5
Темный бугристый материал	drj	10	60	30	
Отложения конусов выноса	dd	5	80	10	5
Отложения русел	cd	5	80	10	5
Останцы материковой местности	me	10	60	30	
Деградированные выбросы	ed	10	50	40	
Гладкие равнины	ups	10	20	70	
Выбросы древнего кратера	uem	10	50	40	

Примечание: Оценка количества компонентов грунта может меняться в пределах $\pm 10\%$

Наибольшее распространение среди геоморфологических комплексов имеет подразделение светлых равнин (таблица 2). Поверхность этого подразделения относительно светлая, пологоволнистая, на которой местами встречаются узкие и низкие гряды, часто сливающиеся в поля и представляющие собой дюны, состоящие из частиц песчаного размера, типичных для марсианских грунтов, 0.06-0.2 мм. В области светлых

равнин, помимо дюнных полей, распространен сцементированный песчаный материал, представляющий собой комковатый грунт и корки выветривания, из которых частицы песчаной и пылевой размерной фракции частично выдуваются ветром.

Таблица 2 – Площадное распространение морфологических подразделений в месте посадки Oxia Planum

Подразделение	Площадь,	Площадь,
eid	9.0	0.4
bem	176.6	7.1
lbr	1281.6	51.4
dpi	457.2	18.4
dd	50.9	2.0
cd	37.2	1.5
me	3.6	0.1
ed	144.0	5.8
ups	268.1	10.8
uem	62.9	2.5

По результатам анализа литературных данных и проведенного геолого-морфологического анализа района посадки Oxia Planum с помощью снимков CTX и HiRISE были рассчитаны количественные соотношения площадей, занимаемых компонентами грунта, в пределах эллипса посадки Oxia Planum (таблица 3) [3,4].

Таблица 3 – Встречаемость и физические свойства типов грунта в пределах эллипса посадки Oxia Planum (типизация грунта основана на миссиях «Викинг-1,2»)

Компоненты грунта	Плотность, г/см ³	Размер зерен, мм	Площадь поверхности, %
Пылевая компонента	1-1.3	0.001-0.01	2-7
Пески	1.1-1.3	0.06-0.2	22-27
Корки выветривания и комковатый грунт	1.1-1.6	0.005-0.5	32-37
Каменистый грунт	1.2-2.0	0.05-3	26-31
Камни	2.6-2.8	2.0-2000	5-10
Глинистые отложения	1.5-1.6	<0.001	0-3

Для создания грунтов-аналогов в качестве основных критериев подбора были выбраны гранулометрический состав грунтов и плотность, так как именно данные характеристики обуславливают физические и механические свойства грунтов.

Гранулометрический состав марсианского грунта характеризуется преобладанием мелких песчаных и пылевых частиц. Диапазон фракций зерен реголита изменяется в соответствии с распространением в том или ином вещественном комплексе.

Так, допустимый диапазон плотности для модельного грунта был выбран по схожим грунтам и принят от $1,1 \text{ г/см}^3$ до $1,9 \text{ г/см}^3$ для тонко-среднезернистого песка, типичным значением является $1,4 \text{ г/см}^3$. Среди минералов, слагающих частицы марсианского грунта, преобладают плагиоклаз $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{--CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, пироксен $(\text{Ca,Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ и оливин $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ с примесью аморфных фаз, по составу приближающихся к глинам. Удельный вес этих минералов (ρ_m) находится в пределах $2,5\text{--}2,7 \text{ г/см}^3$ (плагиоклазы), $3,1\text{--}3,5 \text{ г/см}^3$ (пироксен и оливин) и $2,2\text{--}2,8 \text{ г/см}^3$ (филлосиликаты). Отсюда для грунтов со значениями плотности (ρ) $1\text{--}2 \text{ г/см}^3$ пористость должна составлять 35–65 %.

Среди механических характеристик марсианского реголита наиболее достоверные данные имеются для угла внутреннего трения и сцепления. Они так же, как и физические свойства, ранжируются по типам грунта. Так угол внутреннего трения для эоловых наносов находится в пределах от 15.1 градуса и доходит до 42.2 градусов в комковатом грунте. Значения сцепления (когезии) варьируются от 0.18 кПа для эоловой компоненты грунта до 10.6 кПа в каменистом грунте.

Моделирование марсианского грунта-аналога

Для широкомасштабных натуральных экспериментов, в том числе для бросковых испытаний и отработки посадки космических аппаратов миссии «ЭкзоМарс», а также для создания марсодронов с целью испытания самоходных или иных транспортных средств для передвижения по марсианской поверхности, для проектирования и испытания элементов марсианской инфраструктуры, для разработки и создания технологических комплексов по добыче и обогащению необходимых ресурсов требуются объемы грунта-аналога, измеряемые десятками тонн. При выборе компонентов грунта-аналога для широкомасштабных натуральных экспериментов учитываются несколько основных требований. Во-первых, модель марсианского грунта должна имитировать только основные физико-механические свойства. Во-вторых, составляющие грунта-аналога должны обладать относительно низкой стоимостью и легкой промышленной доступностью в больших объемах. В-третьих, изготовление грунта-аналога и его укладка в стенд должна проводиться с помощью доступных промышленных методов и инструментов [4].

Так как именно количественные характеристики физических и физико-механических свойств являются индикаторами поведения грунта в случае внешних механических воздействий, то при создании МГА необходимо иметь четко определенные требования с заданным интервалом значений для основных физических и физико-механических свойств, полученных на основе анализа опубликованной литературы. Сюда входят плотность, гранулометрический состав, морфология частиц, когезия (сцепление), угол внутреннего трения сухого марсианского реголита. На основе расчетных данных по встречаемости физических свойств разных типов грунта в пределах эллипсов потенциальных мест посадки были построены графики интегральных кривых гранулометрического состава для мест посадки в сравнении с аналогичной кривой на грунт-аналог JSC (рисунок 1).

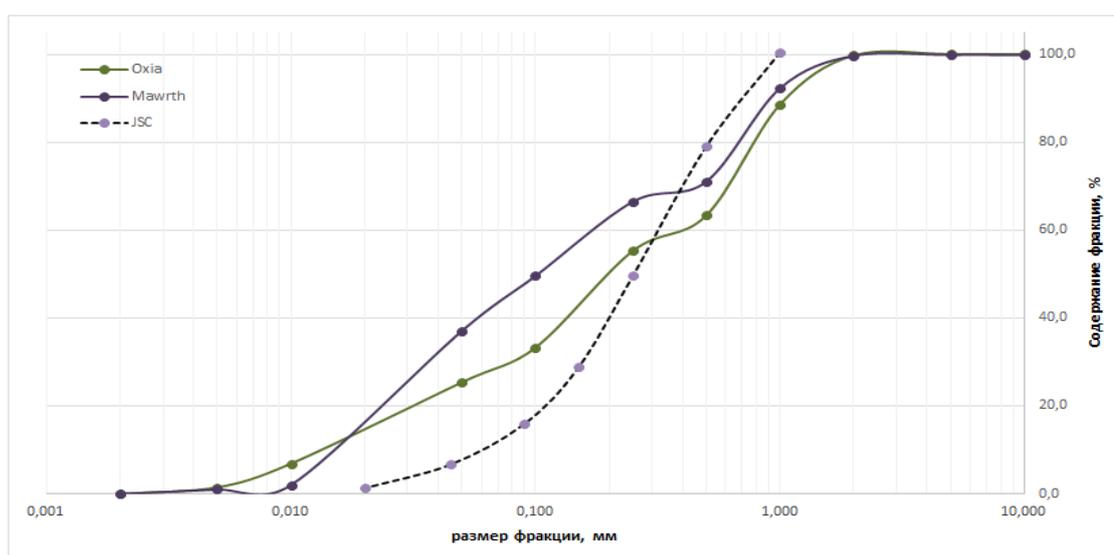


Рисунок 1 – Интегральные кривые гранулометрического состава с мест посадок Oxia Planum, Mawrth Vallis (до 2017 года потенциальное место посадки «ЭкзоМарс-2020») и грунта-аналога JSC.

Подбор необходимых требований был осложнен наличием в пределах потенциальных мест посадки десяти вещественных подразделений, которые характеризуются неравномерным распределением фракций грунта – глинистой, пылевой, песчаной, корок выветривания и комковатого, каменистого, скальных выходов. По итогам анализа определенных вещественных подразделений и компонент грунта в них были построены графики интегральных кривых гранулометрического состава для места посадки Oxia Planum (рисунок 2).

Грунты-аналоги подбирались на основе данных построенных графиков методом предельных кривых. С целью достижения низкой плотности, соответствующей плотности

марсианского реголита, добавлялось больше пылевой фракции, которая была представлена золой-уноса и золошлаком, имеющими невысокую плотность.

Согласно этим оценкам и предложениям на рынке доступных в ценовом отношении материалов, были выбраны 4 вида составляющих для изготовления МГА: кварцевый песок дробленый мелкозернистый фракции 0.5-1.2 мм (допускается 0.5-1.0 мм), кварцевый песок окатанный мелкозернистый фракции 0.19-0.23 мм (допускается 0.1-0.3 мм) (природный), зола-уноса и золошлак.

Каждый из выбранных компонентов рекомендуется к закупке при изготовлении МГА строго в соответствии с ГОСТ (таблица 4).

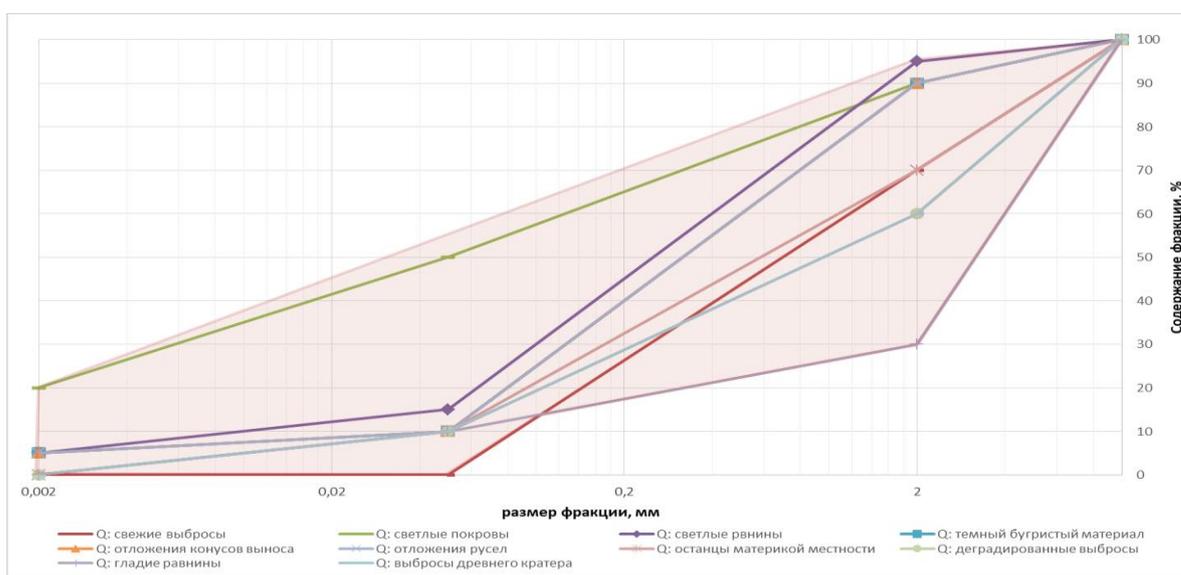


Рисунок 2 – Интегральные кривые гранулометрического состава вещественных подразделений Охиа Планум.

Таблица 4 – Соответствие ГОСТ компонентов, рекомендованных для закупки для изготовления МГА

Компонент	Соответствие ГОСТ
Кварцевый песок дробленый остроугольной формы, фракция 0.5-1.2 мм (допускается 0.5-1.0 мм)	ГОСТ Р 51641-2000. Материалы фильтрующие зернистые. Общие технические условия
Кварцевый песок окатанный,	ГОСТ Р 51641-2000. Материалы фильтрующие

МАТЕРИАЛЫ 5-ОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ДЕНЬ НАУКИ 2020»

фракция 0.19-0.23 мм (допускается 0.1-0.3 мм)	зернистые. Общие технические условия
Зола-уноса	ГОСТ 25818-91. Зола-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия
Золошлак	ГОСТ 25592-91. Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов. Технические условия

Для создания модельного марсианского грунта мы использовали компоненты, которые по гранулометрическому составу относятся к диапазону мелких песчаных и пылевых фракций, так как частицы именно такого размера были наиболее часто зафиксированы в приповерхностной части марсианского грунта по результатам исследований посадочными аппаратами и марсоходами [8]. При создании смесей мы также учитывали морфологию частиц и усредненные значения плотности, характерные для грунта потенциальных мест посадки (таблица 3).

Все выбранные компоненты были подвергнуты серии лабораторных испытаний для определения физических свойств согласно ГОСТ 12536-2014 [9], ГОСТ 5180-2015 [10], ГОСТ 25584-2016 [11]. После теоретических расчетов содержания фракций в грунте-аналоге подобно усредненной модели марсианского грунта были предложены пропорции для смешивания компонентов.

На основе подбора гранулометрического состава были созданы 4 грунта-аналога. (таблица 5). Их интегральные кривые представлены на рисунке 3. Все грунты-аналоги выходят за допустимые рамки в значении фракции 0,5 мм. Подобное отклонение было допущено с целью создания грунтов с меньшей естественной плотностью (таблица 6).

На основе проведенных лабораторных испытаний компонентов были созданы четыре грунта-аналога для предполагаемых мест посадок.

Таблица 5 – Гранулометрический состав грунтов-аналогов

№ п / п	Образец	Гранулометрический состав в % по массе фракций в мм										
		гравийн ый (дресвян ый)		песок					пыль			
		10-	5-2	2-1	1-	0,5	0,25-	0,1-	0,05-	0,01	0,005	<

МАТЕРИАЛЫ 5-ОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ДЕНЬ НАУКИ 2020»

		5			0,5	- 0,2 5	0,1	0,05	0,01	- 0,00 5	- 0,002	0,00 2
1	Грунт-аналог 1	0,0	0,3	11,2	25, 2	8,1	22,0	7,9	18,5	5,4	1,5	0,0
2	Грунт-аналог 2	0,0	0,2	7,4	21, 2	4,6	16,9	12,5	35,1	1,0	1,0	0,0
3	Грунт-аналог 3	0,0	0,1	9,6	33, 2	11, 6	26,6	8,3	7,8	2,0	1,0	0,0
4	Грунт-аналог 4	0,0	0,1	0,8	1,2	12, 7	36,0	10,7	33,6	4,4	0,6	0,0

Таблица 6 – Физические свойства созданных смесей

№ п/п	Образец	Влажность пробы, (%)	Плотность частиц грунта, (г/см ³)	Плотн. песков с наруш. Структурой		Коэф. пористости, (д.е.)	
				плотном состоянии	рыхлом состоянии	плотном состоянии	рыхлом состоянии
				$\rho d \max$	$\rho d \min$	$e \max$	$e \min$
1	Грунт-аналог 1	0,5	2,54	1,69	1,44	0,50	0,76
2	Грунт-аналог 2	0,4	2,48	1,55	1,30	0,60	0,91
3	Грунт-аналог 3	0,2	2,61	1,85	1,59	0,41	0,64
4	Грунт-аналог 4	0,5	2,50	1,57	1,32	0,59	0,89

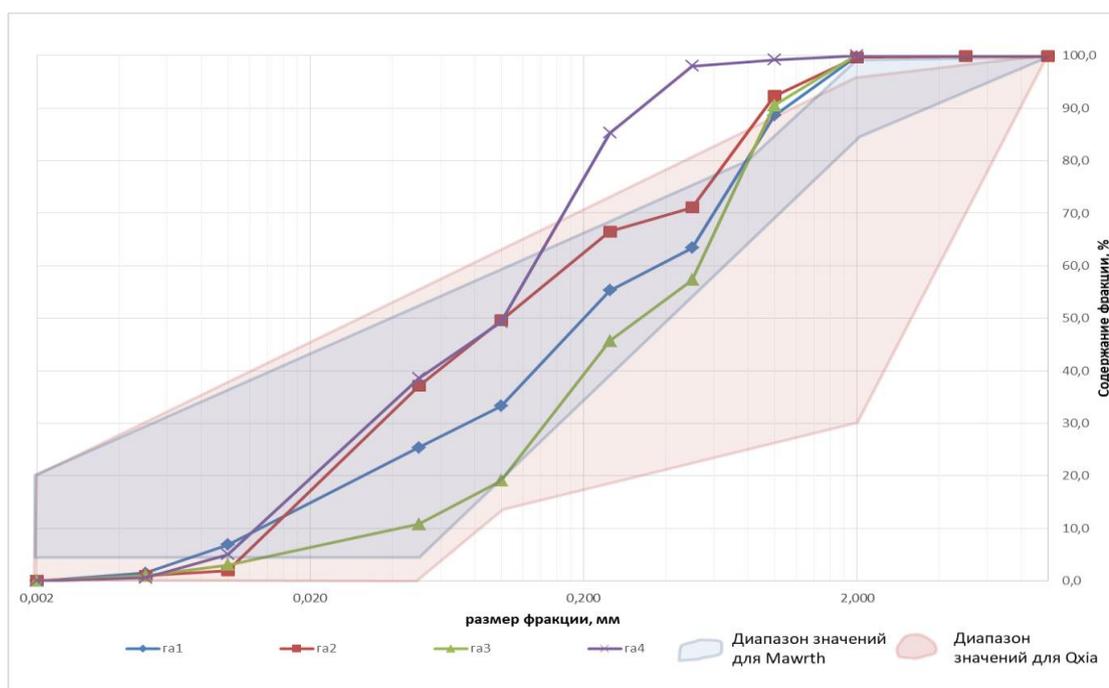


Рисунок 3 – Интегральные кривые гранулометрического состава грунтов-аналогов.

Для выбранных 4 грунтов аналогов были проведены испытания для определения физических и механических свойств и характеризующих их показателей [12]: статический модуль упругости (E_y), динамический модуль упругости (E_d), общий модуль деформации ($E_{общ}$), сцепление (c), угол внутреннего трения (φ), несущая способность (таблица 7). На основе полученных результатов был выбран наиболее подходящий для последующих стендовых испытаний грунт-аналог 2.

Таблица 7 – Физико-механические свойства грунтов-аналогов

Образец	Модуль общей деформации (в диапазоне нагрузок 0.1-0.2 МПа), МПа	Статический модуль упругости, МПа	Предел несущей способности грунта, МПа	Динамический модуль деформации, МПа	Динамический модуль упругости, МПа	Модуль сдвига, МПа	Удельное сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град	Коэффициент трения, д.е.
	$E_{общ}$	E_y	E_y	E_d	$E_{дy}$				
Грунт-аналог 1	12,7	-	0,385	77,6	115,2	1,7	0,011	24	0,445
Грунт-аналог 2	5,6	57,3	0,332	55,3	248,9	1,5	0,007	25	0,458
Грунт-аналог 3	18,7	-	0,384	68,6	117,6	1,2	0,036	28	0,525
Грунт-аналог 4	10,6	67,5	0,451	57,2	148,5	1,3	0,031	25	0,472

Заключение

На основе обзора физических и физико-механических свойств марсианского грунта и свойств существующих грунтов-аналогов, проведенного геолого-морфологического анализа потенциальных мест посадки «ЭкзоМарс-2020» определены основные требования к диапазону характеристик разрабатываемой модели грунта. Проведен поиск исходных компонентов и исследованы их физические свойства, предложены варианты их смешивания для получения искомым характеристик, входящих в заданные диапазоны, которые являются инженерно-геологическими моделями марсианского грунта. По результатам лабораторных испытаний определены физические и физико-механические свойства моделей марсианского грунта. Рекомендован наиболее подходящий образец грунта для проведения бросковых испытаний посадочного модуля «ЭкзоМарс».

Литература

1. ЭкзоМарс - о проекте // Научная программа российских приборов миссии «ЭкзоМарс-2016». URL:<http://exomars.cosmos.ru/index.php?id=1> (дата обращения: 15.01.2020)
2. Иванов М. А., Слюта Е. Н., Гришакина Е. А., Дмитровский А. А. Геолого-морфологический анализ потенциального района посадки КА “ЭКЗОМАРС” OXIA PLANUM // *Астрономический Вестник*. 2020. Т. 54, № 1.С. 1-15. Принята к публикации.
3. Ivanov M.A., Grishakina E.A., Dmitrovskii A.A., Slyuta E.N., Makovchuk V.Y., Sorokin E.M., Uvarova A.V., Voznesensky E.A., Nikitin M.S. ExoMars landing sites in Oxia Palus and Mawrth Vallis: geological characterization // *The Ninth Moscow Solar System Symposium*. — IKI RAS, Moscow, 2018.
4. Grishakina E.A., Dmitrovskii A.A., Ivanov M.A., Sorokin E.M., Makovchuk V.Y., Uvarova A.V., Voznesensky E.A., Nikitin M.S., Sentsova E.A., and Slyuta E.N. Martian soil stimulant for large-scale field experimental research // *The Ninth Moscow Solar System Symposium*. — IKI RAS, Moscow, 2018.
5. ГОСТ Р 51641-2000. Материалы фильтрующие зернистые. Общие технические условия. – Введен 2001-07-01. – М.: Госстандарт России, 2001.
6. ГОСТ 25818-91. Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. – Введен 1991-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1991. - 12 с.
7. ГОСТ 25592-91. Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов. Технические условия (с Изменением №1). – Введен 1991-07-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2002.

8. Демидов Н.Э., Базилевский А.Т., Кузьмин Р.О. Грунт Марса: разновидности, структура, состав, физические свойства, буримость и опасности для посадочных аппаратов // *Астрономический вестник*. 2015. Т. 49, №4. С. 243-261.
9. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – Введен 2015-07-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 18 с.
10. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введен 2016-04-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.
11. ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. – Введен 2017-05-01 – М.: Стандартинформ, 2016. – 22 с.
12. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Введен 2012-01-01 – М.: Стандартинформ, 2011. – 78 с.

**ДЛИТЕЛЬНОВРЕМЕННОЙ МОНИТОРИНГ В ЮЖНОЙ ТУНДРЕ НА
ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ
ГЕОСИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ НАУЧНО-УЧЕБНОГО ПОЛИГОНА ХАНОВЕЙ)**

Безделова А.П.¹, Исаев В.С.², Сергеев Д.О.³

¹Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
abezdelova@mail.ru

¹Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра геоэкологии,
tpomedd@yandex.ru

³Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева, РАН, Москва, Россия; *sergueevdo@mail.ru*

Длительновременные мониторинговые наблюдения на постоянных площадях наблюдений, разбитых в основных структурных частях макрорельефа (водораздел, склон, долина) на основе структурно-динамической классификации В.Б.Сочавы являются основой долгосрочных прогнозов развития криогенной геосистемы на региональном уровне. Структурно-динамический анализ растительных сообществ макрокомбинации (от водораздела до долины) выявляет состояние устойчивости криогенной геосистемы.

LONG-TERM MONITORING BASED ON SPACE-TEMPORARY CLASSIFICATION
OF GEOSYSTEMS IN THE SOUTH TUNDRA (CASE STUDY OF HANOVEY
OBSERVATORY)

Bezdelova A.P.¹, Isayev V.S.², Sergeev D.O.³,

¹Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia; *abezdelova@mail.ru*

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; *tpomedd@yandex.ru*

³Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow, Russia;
sergueevdo@mail.ru

Long-term monitoring observations at constant observation areas, broken down in the main structural parts of the macrorelief (watershed, slope, valley) are the basis for long-term forecasts of the development of a cryogenic geosystem at the regional level. It must be organized following the structural-dynamic classification of V.B.Sochava. The structural-dynamic analysis of plant communities of “macrocombination” (from the watershed to the valley) reveals the state of stability of the cryogenic geosystem.

Растительность чутко реагирует на изменения температуры и влажности и является наиболее значимым индикатором мерзлотных условий. Она является основным “площадным” индикатором многолетней мерзлоты, особенно в южной тундре, где кровля многолетней мерзлоты опускается часто более 1 м и не определяется стандартным промером с помощью щупа. В природной экосистеме изменения растительности и многолетней мерзлоты не всегда синхронны, так как растительный покров первый реагирует на внешние воздействия, но его существенная трансформация служат толчком или “спусковым механизмом” изменения всей криогенной экосистемы. Антропогенные нарушения природной среды в Арктическом регионе усиливают природную активизацию многолетней мерзлоты и формируют новый микро- и мезорельеф, влияющий на распределение тепла и влаги, что изменяет структуру ландшафта в целом.

С увеличением площади антропогенного нарушения в тундровой зоне в условиях климатического потепления актуальным ставится вопрос организации

длительновременного мониторинга криогенной экосистемы в пределах основных форм макрорельефа на основе пространственно-временной или структурно-динамической классификации растительности, при которой однородные растительные сообщества – ценомеры (или при геосистемном подходе – геомеры) в пределах крупных форм рельефа рассматриваются как различные комбинации неоднородных растительных сообществ – ценохор (или – геохор). На топологическом уровне наибольшей структурной единицей является топоценохора, или, при геосистемном подходе, топогеохора [1, 2]. Топоценохора (или макромбинация растительного покрова – фитомакрокомбинация) представлена сочетанием различных участков растительного покрова (ценохорами) или геосистем (геохорами) в пределах макрорельефа от водораздела до речной долины. Закономерная фитомакрокомбинация является структурной единицей геоботанического района [3]. Основные структурные части макрорельефа (водораздельная поверхность, склоны речной долины, речная долина) характеризуются различным закономерным сочетанием растительности по мезорельефу. Фитомезокомбинации представлены эколого-динамическими рядами различных растительных сообществ (гидроморфный, галофитный, псаммофитный, петрофитный и др.), эколого-динамическими рядами сообществ склонов (зоны – сноса, транзита, аккумуляции), экспозиционными сочетаниями растительности склонов, типами болотных массивов и др. [3, 4]. Выделение наименьшей структурной единицы – фитомикрокомбинации или микроценохоры [3, 1] связано с закономерным чередованием сообществ или их фрагментов в пределах микрорельефа и обусловлено различными условиями абиотической среды – увлажнением, засолением и т.д. Микрокомбинации представлены комплексами, микропоясными рядами, сериями растительных сообществ [3].

Однородные растительные сообщества – ассоциации, группы ассоциаций и др. (ценомеры или геомеры) в структуре макрокомбинации В.Б.Сочава рассматривает в структуре системы эпиассоциации, ядром которой является коренная (зональная) растительность, наиболее длительно существующая, т.к. находится в равновесном состоянии климат-растительность, к которой стремятся вернуться все нарушенные сообщества (производные или вторичные) через различные ряды восстановительных сукцессий [1, 2]. Коренная растительность и все ее переменные состояния – потенциальные, квазикоренные (мнимокоренные – растительность болот, песков) и серийные сообщества образуют единую систему эпиассоциации, которая является открытой системой, изменяющейся во времени и пространстве. Пространственное соотношение коренной и потенциальной растительности отражает состояние

устойчивости всей криологической экосистемы, ее способность самовосстановления. Необратимые изменения в криогенной экосистеме проявляются в расширении длительнопроизводных сообществ, подразделяющихся на относительно длительнопроизводные и устойчиво длительнопроизводные, не восстанавливающиеся до коренного сообщества и “образующими устойчивые иные, отличные от коренных растительные сообщества” [5, 3].

В результате исследования на основе структурного анализа макрорельефа в районе станции Хановой выявлено отсутствие зональной растительности; так как рельеф территории представлен сочетанием крупных моренных гряд – мусюр (ср. длина – 5-7 км, отн. высота – 120-100 м, склоны длинные – по 2 км и пологие – 2-3°) с долинными комплексами преимущественно чётковидной формы [6, 7]. На нешироких (1-1,5 км) водоразделах мусюр по площади преобладают обширные усыхающие озерные ледниковые котловины [8], являющиеся остаточными формами ледниковых водоёмов [9 – с.161; 10 – с.409], соединённые небольшими водораздельными поверхностями. На дне озерных котловин развиты разрозненные термокарстовые озера и озёрки – до 35% [11 – с.59; 10 – с.409].

Характерной особенностью региона является повсеместное распространение крупно-бугристой (крупно-блочной) структуры (высота блоков 1-2 м, поперечные размеры 50-70 на 25-45 м) мезорельефа, основными частями которой являются поверхность блока и его склоны различной морфологии. В основных структурных частях макрорельефа (водораздел, склон, речная долина) крупно-бугристая структура различна (рис. 1).

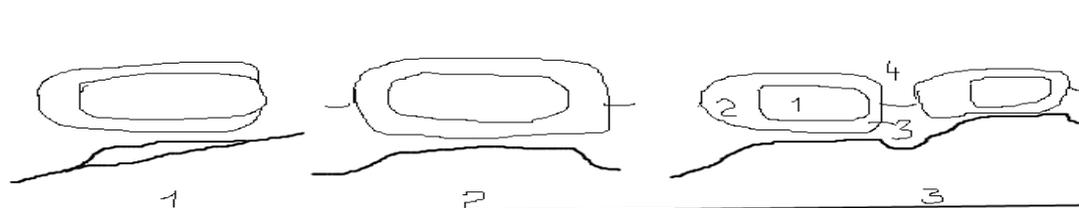


Рис. 1. Схема крупно-бугристой структуры: 1-поверхность, 2-подсклоновая часть, 3-присклоновая часть, 4-межбугристые понижения) в различных структурных частях макрорельефа (1-пологие склоны мусюр и водораздельных котловин. 2-водораздельные котловины, 3-флювиогляциальный террасовидный мезорельеф речной долины.

Крупно-бугристая структура на *пологих склонах мусюр* и водораздельных котловин представлена отдельными разрозненными буграми (25-20% до 35%), разделенными широкими и неглубокими ложбинами (средняя ширина – 15-20 м, глубина – 20-30 см), с выраженной подсклоновой структурной частью, боковыми склонами, поверхностью и отсутствием присклоновой структурной части. Иногда в переходной зоне встречаются маленькие зарастающие озерки или фрагменты сфагновых сообществ. На дне *водораздельных котловин* и в речной долине преобладает крупно-бугристо-западинный комплекс мезорельефа, представленный сочетанием крупно-бугристых структур различных форм (ср. размер - 70-50 x 25-40 м, высота 1-2,5 м), соединённых небольшими (1,5-4,0 м) и неглубокими (0,5-1,0 м) межбугровыми понижениями. На дне *водораздельных котловин* в крупно-бугристой структуре мезорельефа преобладают относительно невысокие равномерные боковые склоны, переходящими в неглубокие и неширокие межбугровые понижения. Присклоновые структурные части фрагментарны по берегам верховьев ручьев. Редкие бугры пучения и крупные торфяники, разделенные заболоченными понижениями, занимают небольшие площади по окраинам термокарстовых озер и озерков. Крупно-бугристая структура в речной долине *р. Воркуты* наиболее выражена и представлена присклоновой, подсклоновой и боковыми частями с преобладанием вытянутой формы блоков в сторону реки, с общим уклоном 1-2°.

Растительность территории исследования юго-восточной части Большеземельской тундры, в районе станции Хановой, относится к полосе крупноерниковых тундр [12] южнотаёжной подзоны тундровой зоны и входит в Восточноевропейскую подпровинцию Европейско-Западносибирской провинции тундровой области [13, 14]. При геоботаническом районировании ЕТР В.Д.Александрова и Т.К.Юрковская в полосе южных тундр Восточноевропейской подпровинция выделяют Воркутинский округ, примыкающий с запада к склону Полярного Урала [7 – с. 16].

В пределах моренногрядово-долинного аккумулятивного ледникового макрорельефа по площади преобладают крупноерниковые (высота *Betula nana* более 50 см) кустарничково-моховые и лишайниково-моховые тундры пологих склонов мусюр и пологих склонов водораздельных озерных котловин (65-70% площади макрорельефа). В долинном комплексе и на дне обширных водораздельных ледниковых озер в структуре крупно-бугристо-западинного комплекса мезорельефа наиболее распространена мелкоерниковая (*Betula nana* – 20-30 см) кустарничково-лишайниковая и мохово-

лишайниковая тундра. Крупноерниковые кустарничково-моховые тундры занимают лишь неширокие и неглубокие межбугровые понижения (25%).

Научно-учебный полигон расположен в долине реки Воркуты на 2-х ледниковых (водно-ледниковых?) террасовидных структурных комплексах, разбитых дренирующим ручьём и представленных комплексами крупно-бугристо-западного мезорельефа на различных высотных ступенях (рис. 2).

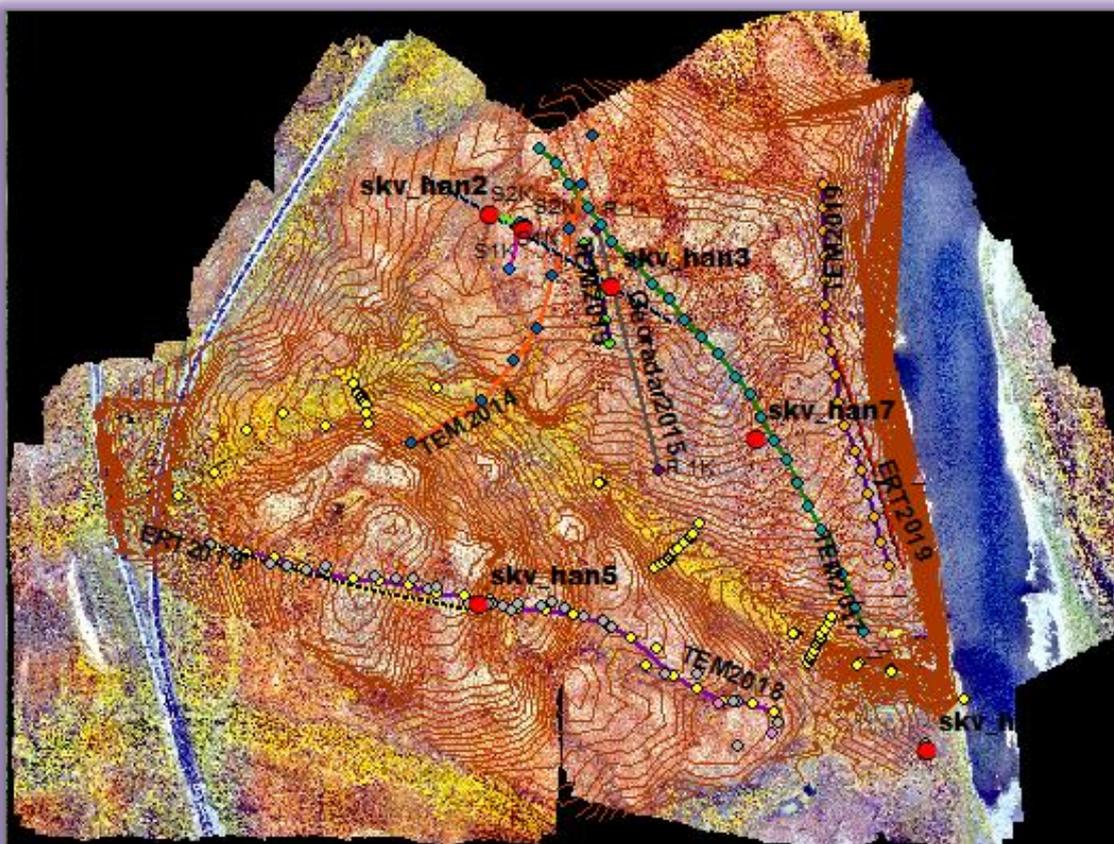


Рис. 2. Научно-учебный полигон в долине реки Воркуты на ледниковых (водно-ледниковых?) террасовидных высотных структурных комплексах крупно-бугристо-западного мезорельефа, разбитых дренирующим ручьём . [Пособие по Воркутинской практике, в печати]

Пространственное распределение растительных сообществ обусловлено структурой мезорельефа речной долины (табл. 1). В структуре крупно-бугристо-западной мезокомбинации растительности выделяются следующие закономерные сочетания различных растительных сообществ.

Крупно-бугристые поверхности занимают наиболее холодолюбивые сообщества кустарничково-лишайниковой тундры с единичным участием березы карликовой (*Betula nana*) с наименьшей высотой 15-17 см. Характерными видами кустарничково-лишайниковой тундры являются арктоальпийские шпалерные кустарнички - водяника

почти-голарктическа или полярная (*Empetrum subholarcticum*), арктоус альпийский или толокнянка альпийска (*Arctous alpina*), редко встречается луазелеурия лежачая (*Loiseleuria procumbens*). Из лишайников представлены арктоальпийские виды – тамнолия червеобразная (*Thamnolia vermicularis*), флавоцетрария снежная (*Flavocetraria nivalis*) или цетрария снежная (*Cetraria nivalis*), цетрария исландская (*Cetraria islandica*), говардия черноватая (*Gowardia nigricans*) или алектория черноватая (*Alectoria nigricans*), говардия арктическая (*Gowardia arctica*), алектория бледно-охряная (*Alectoria ochroleuca*). Моховой покров характеризуют – аулакомниум вздутый (*Aulacomnium turgidum*), томенгипнум блестящий (*Tomenthypnum nitens*) или камптотетий волосовидный, дикранум удлиненный (*Dicranum elongatum*).

На склонах крупно-бугристой структуры преобладает мелкоерниковая кустарничково-лишайниковая тундра, сменяющаяся по склону мохово-лишайниковой и моховой тундрой. В мелкоерниковой кустарничково-лишайниковой тундре на склонах крупных блоков увеличивается обилие (с 12-15% до 45-70%) и высота (с 17-20 см до 30-35 см) ерника – берёзы карликовой (*Betula nana*). Из кустарничков представлены гипоарктические виды, характерные для северной лесотундры и тундры - голубика мелколистная (*Vaccinium uliginosum subsp. microphellum*), брусника малая (*Vaccinium minus*), багульник стелющийся (*Ledum decumbens*) и морошка (*Rubus chamaemorus*). Шпалерные арктоальпийские кустарнички (арктоус альпийский, водяника полярная) выпадают. В моховом покрове преобладают виды бореальных хвойных лесов - плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi*), и гилокомиум блестящий (*Hylocomium splendens*). Среди лишайников доминирует кладония оленья (*Cladonia rangiferina*) и кладония лесная (*Cladonia arbuscula*), редко встречается кладония звездчатая (*Cladonia stellaris*) и пелтигера (*Peltigera sp.*).

В межбугровых понижениях преобладают крупноерниковые кустарничково-осоково-моховые тундры с высоким обилием осоки шаровидной (*Carex globularis*) и преобладанием голубики мелколистной (*Vaccinium uliginosum subsp. microphellum*) или морошки – *Rubus chamaemorus*. Разреженно встречается черника (*Vaccinium myrtillus*). Моховой покровов сплошной из плевроциума Шребера (*Pleurozium schreberi*) и гилокомиума блестящего (*Hylocomium splendens*). Из лишайников изредка встречается кладония оленья (*Cladonia rangiferina*) небольшими скоплениями. В межбугровых понижениях со слабо выраженным поверхностным стоком распространены крупноерниковые разнотравно-осоково-хвощово-моховые (редкопокровные – 20-25% под

МАТЕРИАЛЫ 5-ОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ДЕНЬ НАУКИ 2020»

сомкнутым покровом ерника) сообщества. При увеличении поверхностного стока формируются крупноивняковые разнотравно-осоково-хвощовые сообщества с ивами красивой (*Salix pulchra*), филиколистной (*Salix phylicifolia*), сизой (*Salix glauca*), переходящие при увеличении ложбины стока в крупноивняковые осоково-злаково-разнотравные с высокотравьем (редкопокровные) растительные сообщества. По берегам дренирующих ручьев представлены ивняки осоковые. Гидроморфный ряд межбугровых западин от бессточных к дренирующим характеризует – крупноерниковая кустарничково-осоково-моховая → крупноерниковая разнотравно-осоково-хвощово-моховая → крупноивняковая разнотравно-осоково-хвощовая (редкопокровная) → крупноивняковая осоково-злаково-разнотравная с высокотравьем (редкопокровная) → крупноивняково-осоковые сообщества по краям дренирующего ручья.

Табл.1. Пространственное распределение растительности в структуре мезорельефа речной долины

Структура мезорельефа				Растительность		
Лесничные (водолициновые?) террасовидные структурные комплексы крупно-бугристо-западного мезорельефа	Межбугровые понижения	верхняя часть		кустарничковая-	кустарничково-лишайниковая с ерником	
		боковые склоны			мелкоерниковая кустарничково-лишайниковая-	
		присклоновая часть	верхняя часть			мелкоерниковая кустарничково-лишайниковая
			нижняя часть			мелкоерниковая кустарничково-мохово-лишайниковая или лишайниково-моховая
		подгорная часть	верхняя часть		мелкоерниковая	мелкоерниковая кустарничково-лишайниковая -
			средняя часть			мелкоерниковая кустарничково-мохово-лишайниковая
			нижняя часть			мелкоерниковая кустарничково-моховая с лишайником
			узкая полоса внизу склона		крупноерниковая	крупноерниковая осоково-моховая-
		западины	не дренирующие		крупноерниковые	крупноерниковая кустарничково-осоково-моховая
			фрагментарный сток			крупноерниковая разнотравно-осоково-хвощово-моховая (редкопокровная)
	сток небольшой, до 10см			крупноивняковые	крупноивняковая разнотравно-осоково-хвощевая с ерником (редкопокровная)	
	русло стока до 30см				Крупноивняковая осоково-злаково-разнотравная с-высокотравьем (редкопокровная)	
	озерки или осоко-сфагnumовые фрагменты				осоково-сфагnumовая	
	Ручьи дренирующие		выраженное русло стока	русло 4-7м	Крупноиво-осоковые	Крупноивняково-осоковая

Динамическое состояние различных растительных сообществ отражается в структурном соотношении коренных (рис. 3г) и производных (рис. 3а,д) растительных сообществ. В долине р. Воркуты преобладают различные ряды восстановительных пирогенных сукцессий, что связано с последствиями неоднократных пожаров вблизи бывшего поселка Хановой, численность которого доходила до 3000 жителей. Многократные пожары в речной долине привели к сокращению площади кустарничково-лишайниковых наиболее холодных сообществ крупно-бугристых поверхностей, представленных часто небольшими фрагментами или мелкоерниковой кустарничково-лишайниковой тундрой с арктоальпийскими кустарничками и лишайниками.

Последствия пирогенного воздействия различны от его силы, площади и исходных геоэкологических условий. В результате неравномерного выгорания лишайника и кустарничков с мохово-лишайниковым и моховым напочвенным покровом, изменяется горизонтальная структура сообщества, формируется бугорковый (или бугорково-западинный) криогенный комплекс, представленный кустарничково-лишайниково-моховыми возвышенными фрагментами (высота 20 см, поперечные размеры 50x70 см) в сочетании с лишайниковым редкопокровным напочвенным покровом, с единичными видами кустарничков (рис. 3а). Высота напочвенного покрова в кустарничковых фрагментах составляет 10-12 см, а в лишайниковом покрове – 3-4 см (Рис. 3б), что отражается в различном температурном режиме почв, контрастность которого ярче проявляется под моховым покровом (рис.3.в.). В различных сообществах крупно-бугристой структуры мезорельефа криогенный бугорково-западинный комплекс выражен различно. На поверхностях крупно-бугристого мезорельефа превышение небольшое – до 20 см (рис. 3а), на склонах превышение увеличивается (до 30-40 см) и достигает максимального значения в межбугристых понижениях и в нижней части склона – до 50-70 см (рис. 3д).

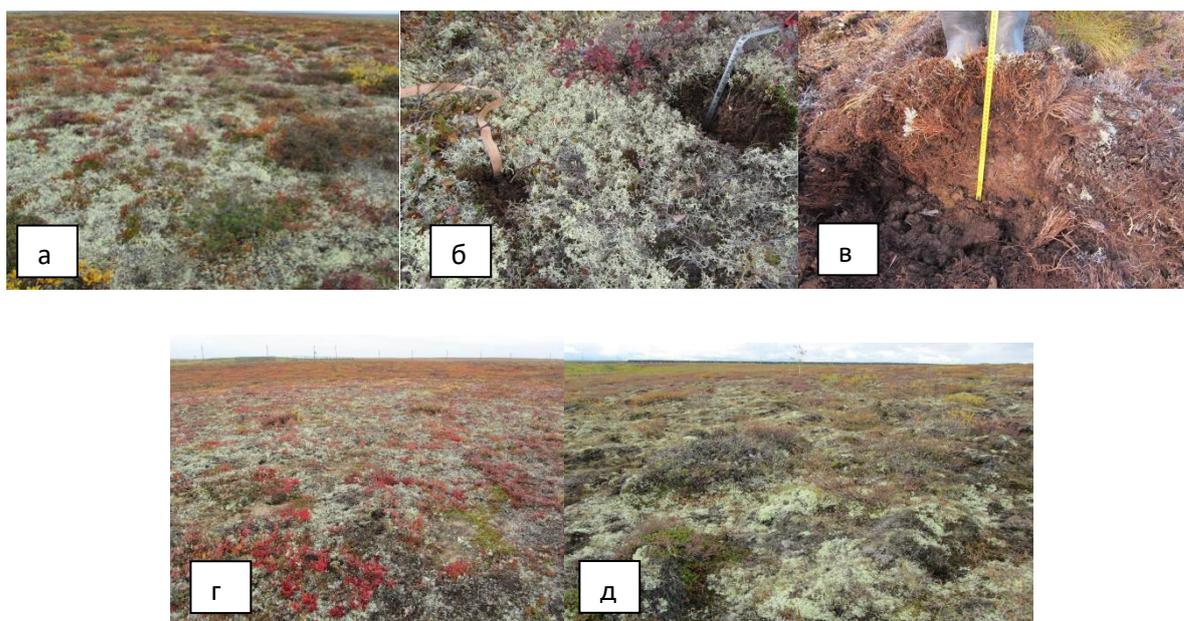


Рис. 3. Мелкоерниковая кустарничково-лишайниковая тундра с арктоальпийскими кустарничками (пояснения в тексте).

В нарушенных сообществах сокращается обилие арктоальпийских кустарничков (*Arctous alpina*, *Empetrum subholarticum*), увеличивается обилие и высота ерника, появляются пирогенные виды: лугово-тундровый вид [15] - вейник лапландский (*Calamagrostis lapponica*) на поверхностях крупно-бугристых структур и лесной, евразийский бореальный вид, индикатор увлажнения - осока шаровидная (*Carex globularis*) на склонах крупно-бугристых структур и в межбугристых западинах.

Преобладание в речной долине производных тундровых сообществ, в результате обширного антропогенного нарушения коренной растительности, указывает на значительные изменения в криогенной геосистеме, что также отражается часто в отсутствии корреляции растительных сообществ с глубиной залегания кровли многолетней мерзлоты, даже в наиболее холодных местообитаниях на поверхностях крупно-бугристых структур. Длительновременные мониторинговые наблюдения за температурным режимом верхних почвенных горизонтов и динамикой растительности в основных структурных частях мезорельефа позволят выявить восстановительную способность криогенной геосистемы или ее порог невозврата и формирование иной растительности отличной от коренной с другими абиотическими условиями.

Залючение

Таким образом, исследования в пределах основных частей макрорельефа – водораздел, склон, долина, показали, что геосистемы речной долины отражают в наибольшей степени последствия антропогенного воздействия, которые в свою очередь вызовут изменения на пологих склонах мусюр в поверхностном стоке, в растительности и температурном режиме верхних почвенных горизонтов. То есть, изменения в различных структурных частях макрорельефа (водораздел, склон, долина), представленных различными закономерными сочетаниями растительных сообществ в пределах мезорельефа, однонаправлены и взаимообусловлены и отражают региональное состояние криогенной экосистемы. Длительновременные наблюдения на постоянных площадях наблюдений в основных структурных частях макрорельефа позволят выявить динамику криосистемы в пространстве и во времени на региональном уровне и являются основой долгосрочных прогнозов.

Литература

1. Сочава В.Б. Классификация растительности как иерархия динамических систем / Геоботаническое картографирование. Л.: Наука, 1972, с. 3-18.
2. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978, 319 с.
3. Грибова С.А., Исаченко Т.И. Динамика растительности и ее картографирование // Полевая геоботаника. Т. IV, Л.: Наука, 1972, с. 162-173.
4. Карпенко А.С. Отражение динамики южнотаёжной растительности на крупномасштабных геоботанических картах // Геоботаническое картографирование. М.-Л.: Наука, 1965, с. 23-32.
5. Сукачев В.Н. Руководство к исследованию типов лесов. М.-Л.: Гос. с/х изд., 1930, 318 с.
6. Станкевич Е.Ф. Четвертичные отложения восточной части Большеземельской тундры // Известия АН. Серия геологическая, №5, 1962.
7. Геоботаническое районирование Нечерноземья европейской части РСФСР / под ред. В.Д. Александровой, Т.К. Юрковской. Л.: Наука, 1989, 64 с.

8. Андреев В.И. Гидролакколиты (булгуньяхи) в Западно-Сибирских тундрах // Известия Государственного Географического общества, 1936, Том 68, Вып. 2, с. 186-210.
9. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Озера северо-восточной части ЕТР / Озёра европейской части России. СПб.: ЛЕМА, 2015, 392 с.
10. Даувальтер В.А., Хлопцева Е.В. Гидрологические и гидрохимические особенности озёр Большеземельской тундры // Вестник МГТУ. Т. 11, №3, 2008, с. 407-414.
11. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Миграционные бугры пучения на Европейском Севере России – южный и северный пределы ареала и современная динамика // Инженерная геология. М., ПНИИИС, 2011, № 2, с. 56-72.
12. Грибова С.А. Широтная дифференциация растительного покрова тундр европейской равнины // Проблемы экологии, геоботаники, ботанической географии и флористики. Л.: Наука, 1977, с. 37-46.
13. Растительность европейской части СССР / под ред. С.А.Грибовой, Т.И.Исаченко, Е.М.Лавренко. Л.: Наука, 1980, 429 с.
14. Огуреева Г.Н. Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий. Масштаб 1:8 000 000. Пояснительный текст и легенда к карте. М., 1999, 64 с.
15. Поспелова Е.Н., Поспелов И.Н. Флора Таймыра и сопредельных территорий <<http://byrranga.ru/>>.

ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО УРОВНЯ КАРСКОГО МОРЯ В ПОСЛЕДНИКОВОЕ ВРЕМЯ

Баранская А.В.¹

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия;

alisa.baranskaya@yandex.ru

Были проанализированы литературные и собственные полевые данные об изменениях относительного уровня Карского моря за последние тысячелетия. Выявлено, что, несмотря на общее повышение уровня моря со времени максимума последнего оледенения, уровень моря менялся по-разному в пределах соседних блоков земной коры. В то время как на шельфе Карского моря уровень рос со значительной скоростью на протяжении всего голоцена, небольшое повышение произошло в середине голоцена на острове Белый. На полуострове Явей такого высокого уровня не было.

POST-GLACIAL CHANGES OF THE KARA SEA LEVEL

Baranskaya A.V.¹

¹ Lomonosov MSU, department of Geography, Moscow, Russia;

alisa.baranskaya@yandex.ru

Published and own field data on changes in the relative level of the Kara Sea over the past millennia were analyzed. It was found out that, despite a general rise in sea level since the time of the Last Glacial Maximum, there were differences between the relative sea level of neighboring blocks of the Earth's crust. While the level on the shelf of the Kara Sea increased at a considerable rate throughout the Holocene, a slight highstand occurred in the middle of the Holocene on Belyi Island. At Yamal Peninsula, such a highstand did not happen.

Введение

Рост уровня моря на арктических побережьях [1; 2] – одна из острых проблем, связанных с современными изменениями климата и природной среды, особенно сильно проявляющимися за Полярным Кругом [3]). Данные об изменениях относительного уровня моря и о скоростях отступления берегов в прошлом и будущем необходимы как для навигации, так и для проектирования и строительства хозяйственных объектов в береговой зоне [4]. Повышающийся уровень моря создает риски более высоких штормовых нагонов, частых наводнений и более интенсивного волнового воздействия на берега. Знание амплитуд и скоростей изменения уровня моря поможет спланировать размещение и конструкцию будущих сооружений и инфраструктуры так, чтобы минимизировать потенциальные риски [5].

Сегодняшние изменения уровня моря предопределены эвстатическим ростом уровня Мирового Океана, с одной стороны, и вертикальными движениями земной коры, с другой стороны, которые, в свою очередь, зависят от процессов гляциоизостатической компенсации. Области, находившиеся под покровным ледником, покрывавшим северо-запад Евразии во время последнего оледенения 26-12 тыс. лет назад, испытывают поднятие после снятия нагрузки, а области вокруг краев бывшего ледника (область краевого прогиба, или компенсационного вала), напротив, опускаются, что приводит к особенно быстрому затоплению территории. Современные технологии позволяют моделировать процессы гляциоизостатической компенсации для понимания механизмов изменения уровня моря и их прогноза. Результаты моделирования зависят от точности параметров, заложенных в модели: границ и времени существования древних ледников [6; 7], параметров мантии и литосферы [8]. Для калибровки и верификации моделей необходимы данные об изменении уровня моря в недалеком геологическом прошлом.

Карское море - ключевой регион для понимания особенностей изменения уровня моря в Арктике за последние 26 тысяч лет. Граница максимального распространения последнего покровного ледника располагалась северо-восточнее побережья Ямала и Гыдана (рис. 1). Это позволяет предположить, что компенсационный прогиб, который после снятия нагрузки ледника должен был опускаться, располагается именно здесь. Таким образом, именно Карский регион, исходя из теории гляциоизостатических движений земной коры, подвергается риску особенно быстрого повышения уровня моря. В то время, как пределы распространения компенсационных прогибов вокруг Лаврентийского ледникового щита и западной части Евразийского щита [9; 10; 11; 12; 13] изучены хорошо, в российской Арктике данный вопрос до сих пор не затрагивался фундаментальными исследованиями.

Цель настоящей работы - обзор опубликованных геологических данных и собственных полевых данных об изменениях уровня Карского моря в позднем неоплейстоцене и голоцене.

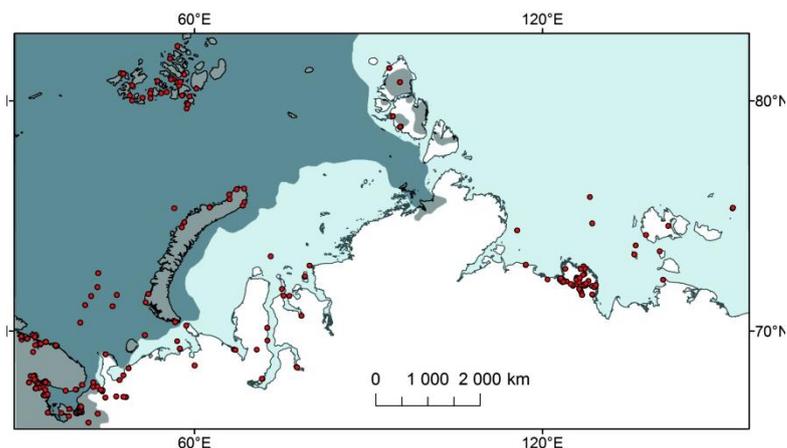


Рис. 1. Распространение последнего покровного оледенения (26-12 тыс. лет назад) в период его максимального развития, согласно Svendsen et al., 2004. Красными точками показаны места, в которых есть геологическая информация о положении уровня моря в прошлом (с 30 тыс. лет назад до сегодняшнего дня)

Изменения относительного уровня Карского моря в послеледниковое время по литературным данным

В целом, данных об изменениях относительного уровня моря на севере Западной Сибири и шельфе Карского мало, как из-за труднодоступности и недостаточной изученности территории, так и из-за того, что получение данных о положении уровня моря ниже современного требует более дорогих и трудоемких работ (бурение донных колонок морских отложений и др.) по сравнению с изучением поднятых морских террас на суше. Тем не менее, даже единичные присутствующие данные позволяют оценить общие тенденции изменения относительного уровня моря. На шельфе Карского моря относительный уровень моря находился на отметках от -38 до -40 м около 9 тыс. лет назад, по данным донных колонок морских осадков. По сравнению, к примеру, с шельфом моря Лаптевых, где 9 тыс. лет назад уровень моря находился на отметках около -27 м, шельф Карского моря испытывал относительное погружение, что также не противоречит гипотезе об опускании бывшего компенсационного вала.

Данные по северу Западной Сибири и Северной Земле более противоречивы. Присутствуют свидетельства необычно высокого положения относительного уровня моря во время максимума последнего оледенения 17-25 тыс. лет назад (лайдовый торф на Ямале и раковины морских моллюсков на Северной Земле, рис. 2). Затем относительный уровень моря понизился. Если на Северной Земле его понижение можно объяснить вероятным гляциоизостатическим поднятием после таяния небольших горных ледников (поскольку покровное оледенение границ Северной Земли, согласно Svendsen et al., 2004,

не достигало), то на севере Ямала и Гыдана его природа остается не до конца ясной. В конце голоцена (2-4 тыс. лет назад) уровень моря вновь поднялся чуть выше современного, что могло быть вызвано как тектоническим поднятием, так и гидроизостатическими процессами, изостатическим выравниванием континентов, ротационными процессами, связанными с особенностями вращения Земли или, в случае Северной Земли, гляциоизостатическим поднятием, вызванным продолжающимся таянием горных ледников.

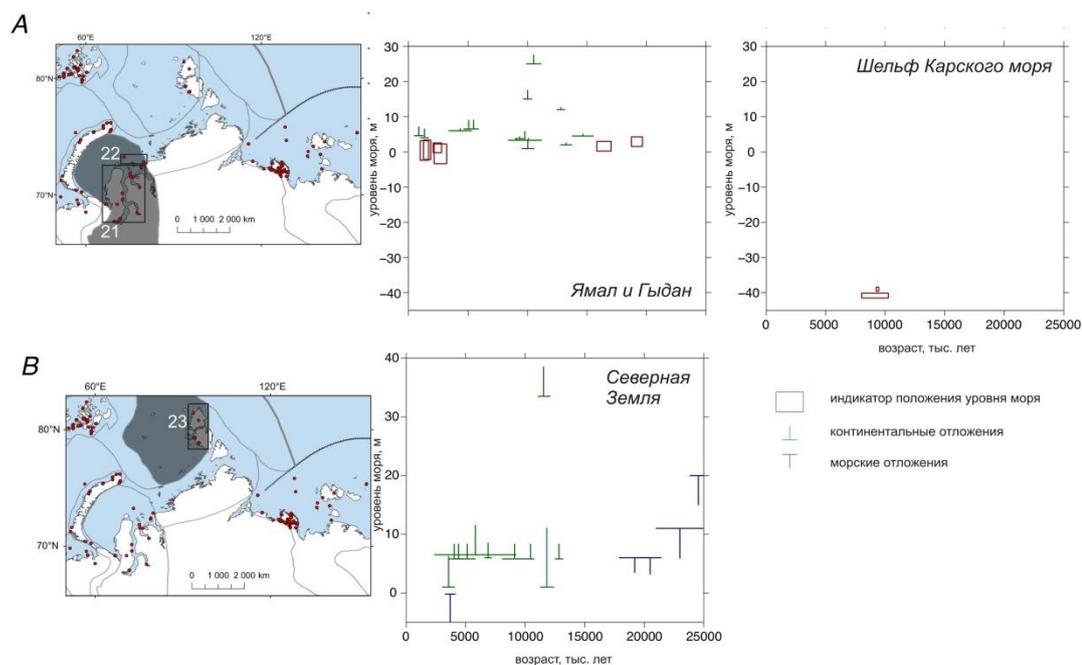


Рис. 2. Реконструкция относительного уровня моря в послеледниковое время на севере Западной Сибири

Изменения относительного уровня Карского моря в послеледниковое время по собственным данным

По результатам собственных полевых исследований была получена новая информация о континентальных и морских отложениях позднего плейстоцена и голоцена в Российской Арктике.

Остров Белый

Разрез многолетнемерзлых отложений на восточном и западном берегу острова Белого состоит из трёх толщ (рис. 3).

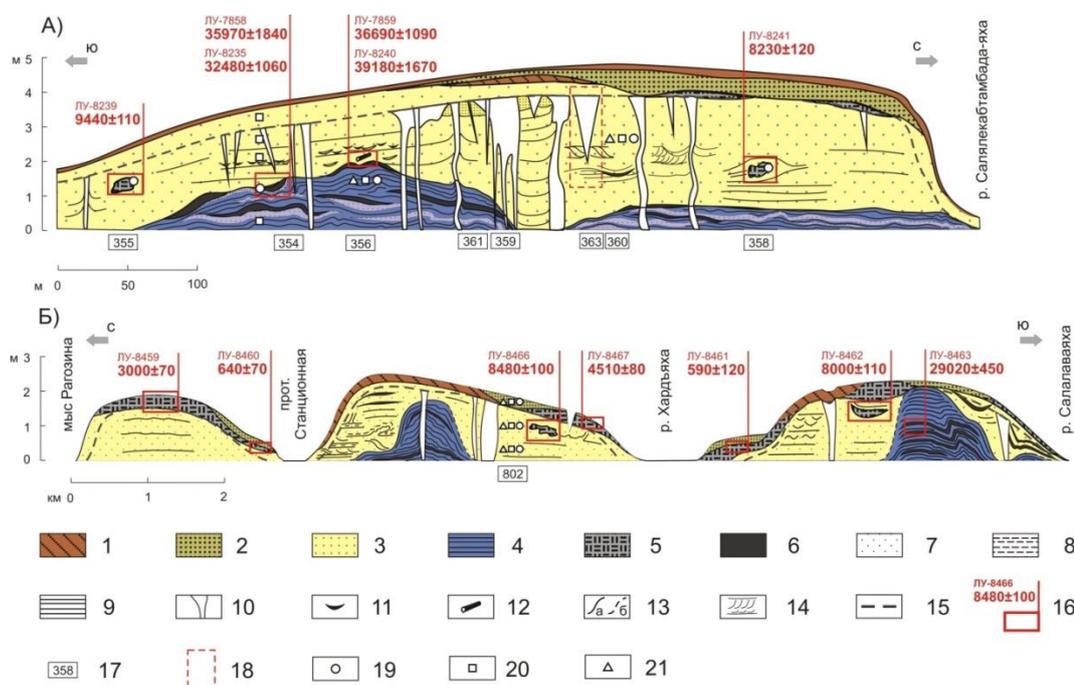


Рис. 3. Схема строения видимого разреза четвертичных отложений А) восточной части острова Белого к юго-востоку от радиолокационного знака "Футшотчный" и устья Салылекабтамбада-яхи; Б) западной части острова Белого от мыса Рагозина до устья Салалаваяхи (по: [14]). Состав и генезис отложений: 1 - покровные отложения: опесчаненные суглинки с торфом; 2- золотые отложения: мелкозернистые пески; 3 - прибрежно-морские отложения: пески с прослоями растительного детрита, аллохтонным торфом и древесиной; 4 - морские отложения: глины, пески и суглинки параллельнослоистые, со следами криогенной деформации, с линзами намывного мохового войлока и растительного детрита. Литологический состав отложений: 5 - торф, 6 - намывной моховый войлок и растительный детрит, 7 - песок, 8 - суглинок, 9 - глина. Прочие обозначения: 10 - ледяные жилы, 11 - линзы органического вещества, 12 - древесина, 13 - геологические границы: а) достоверные, б) предполагаемые, 14 - слоистость, 15 - нижняя граница сезонно-талого слоя, 16 - лабораторный номер и радиоуглеродный возраст, 14С лет назад, 17 - номер расчистки, 18 - место отбора образцов из ледяной жилы на изотопный состав ($\delta^{18}O$ и δD) (рис. 5), места отбора образцов: 19 - на диатомовый анализ, 20 - на гранулометрический анализ, 21 - на анализ химического состава водной вытяжки

Нижняя из них вскрывается на высоте до 1,5 м, иногда уходя под урез моря; она сложена параллельнослоистыми глинами и суглинками со значительным количеством намывного мохового войлока, датированного 35970±1840 (ЛУ-7858) и 32480±1060 (ЛУ-8235) радиоуглеродными годами в восточной и 29020±450 (ЛУ-8463) лет в западной части острова. Отложения сильнозасоленные, сумма водорастворимых солей составляет 1,33 %. Микрофоссилий в них мало: единичные обломки вымерших палеогеновых диатомей *Paralia grunowii* Gles. и неопределимые обломки створок морских центрических диатомей, спикулы губок. Слоистость значительно деформирована процессами промерзания и протаивания. Предполагается морское или прибрежно-морское происхождение толщи:

она накапливалась в условиях илистой приливной осушки или, что менее вероятно, на дне мелководного залива в МИС 3 (каргинское время по региональной шкале).

Средняя толща светло-серых и желто-серых песков слагает большую часть береговых уступов. Она отличается чередованием параллельной слоистости и слоистости ряби; присутствуют мультислойные каналы врезания, характерные для приливно-отливной зоны. Встречаются линзы торфа возрастом от 8000 ± 110 (ЛУ-8462) до 9440 ± 110 (ЛУ-8239) радиоуглеродных лет, которые, судя по их "рваным" краям и облеканию песками, были переотложены в водной обстановке. Несмотря на высокую сортированность средней толщи, которая скорее была бы характерна для эоловых отложений (фракция мелкого песка составляет более 90%), и низкую засоленность (отложения относятся к незасоленным или слабозасоленным), по совокупности осадочных текстур (слоистость, каналы врезания, аллохтонные линзы торфа) можно предположить водную обстановку накопления и морское происхождение. Подтверждает эту гипотезу то, что и современные пляжевые отложения очень хорошо сортированы, а засоленность их значительно изменяется по латерали и с глубиной: присутствуют как средnezасоленные, так и незасоленные пески. Средняя толща сформировалась между 8 тыс. радиоуглеродных лет назад и 4510 ± 80 (ЛУ-8467) радиоуглеродных лет назад, судя по времени начала накопления вышележащих протяженных горизонтов автохтонного торфа верхней толщи. Помимо торфа, верхняя маломощная (до 0,4 м в восточной и до 1 м в западной части острова) толща включает переслаивание оторфованных суглинков с плохо отмытыми мелкозернистыми буро-палевыми песками эолового происхождения (современные надувы песка на тундровой равнине свидетельствуют о том, что процесс продолжается и по сей день). Верхняя толща формировалась на суше с 4,5 тыс. лет назад до настоящего времени.

Таким образом, остров Белый сложен морскими отложениями МИС 3, на которых залегают прибрежно-морские пески, сформировавшиеся в атлантическое-суббореальное время, перекрытые маломощными позднеголоценовыми континентальными осадками. Такая же картина наблюдается на расположенном к востоку острове Сибирякова [15]. Выявлено, что относительный уровень моря в районе острова Белого поднимался не менее, чем на 2 м над современным от 8 до 4,5 тыс. радиоуглеродных лет назад.

Север Гыданского полуострова в районе оз. Тиребято

На западном побережье полуострова Явай на траверзе озера Тиребято нижняя толща, обнажающаяся в разрезе равнины высотой 12-15 м (рис. 4), похожа на морскую

толщу из оснований обрывов острова Белого и Сибирякова. Она вскрывается на высоте до 7 м над уровнем моря и, как и на острове Белом, иногда опускается под урез, сложена параллельнослоистыми сизо-серыми суглинками с неполносетчатой криогенной текстурой, хорошо отмытыми светло-серыми песками с флазерной слоистостью и плохо отмытыми рыже-бурыми песками с щепками и древесным детритом. По осадочным текстурам (слоистость в песках, смена тонкого материала крупным вверх по разрезу) можно сделать вывод о водной обстановке осадконакопления с часто менявшейся гидродинамикой. Значительная засоленность песков предполагает морское происхождение.

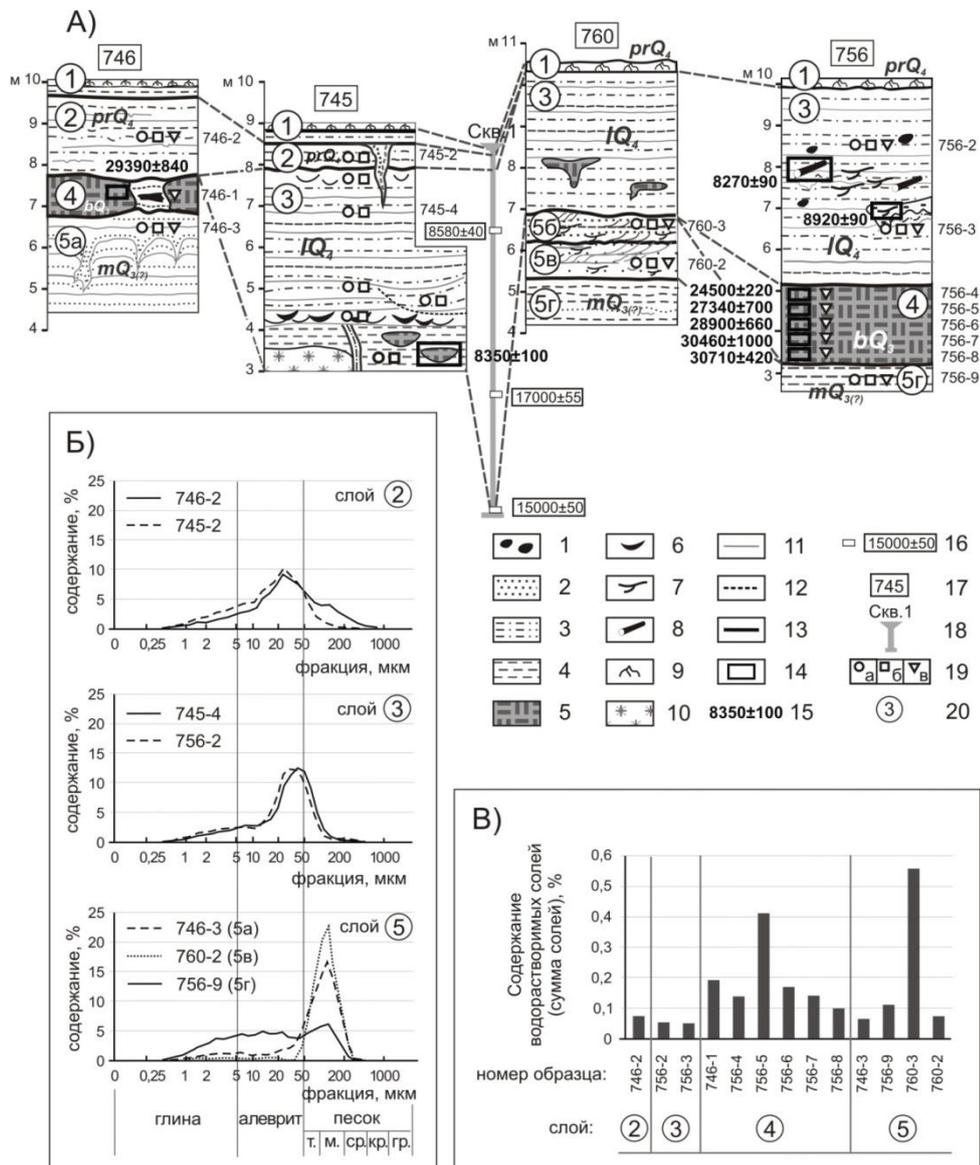


Рис. 4. А) Детальный разрез четвертичных отложений западного берега полуострова Явай (по: [16]). Условные обозначения: 1 - галька; 2 - песок; 3- супесь; 4 - суглинок; 5 - торф; 6 - линзы органического материала; 7 - растительный детрит, щепки; 8 - древесина; 9 - корни растений; 10 - погребенный снежник; 11 - линии напластования (слоистость); 12 - сброс в толще супесей; 13 - границы геологических тел; 14 - места

отбора проб на радиоуглеродный анализ; 15 - конвенциональный радиоуглеродный возраст органических остатков, лет назад; 16 - AMS- возраст органического вещества в ядрах, лет назад; 17 - номер расчистки; 18 - расположение скважины; 19 - места отбора образцов: а) на диатомовый анализ, б) - на гранулометрический анализ, в) - на анализ химического состава водной вытяжки; 20 - индекс слоя: 1) покровная супесь с дерниной; 2) переслаивание бурых супесей и суглинков с криотурбациями, 3) горизонтальное параллельное переслаивание светло-палевых супесей и палево-бурых суглинков, 4) торф; торф, переслаивающийся с супесью и песком, 5а) параллельнослоистые серо-палевые пески с псевдоморфозами по вытаявшим ледяным жилам, 5б) переслаивание ярко-бурых суглинков и светло-серых хорошо отмытых песков с многочисленным щепочным детритом и косою слоистостью, 5в) светло-серый хорошо отмытый песок с щепочным детритом, с косою и фазерной слоистостью, 5г) сизо-серый тяжелый суглинок с прослоями супеси и песка, с неполносетчатой криогенной текстурой. Генетические индексы отложений: mQ3?: морские отложения не моложе третьей ступени верхнего неоплейстоцена (МИС 3); bQ3 - позднеплейстоценовые болотные отложения (МИС 3); IQ4 - голоценовые озерные отложения; prQ4: голоценовые и современные покровные и склоновые отложения. Б) Дифференциальные кривые крупности частиц отложений полуострова Явай по данным гранулометрического анализа. В) Гистограммы засоленности отложений полуострова Явай

Выше по разрезу встречаются прослои и линзы торфа, переслаивающегося с супесью, общей мощностью до 1,5-2 м. Его радиоуглеродный возраст составляет от 24500 ± 220 (ЛУ-7972) до 30710 ± 420 (ЛУ-7971) лет. Ненарушенное залегание и значительная (до десятков метров) протяженность прослоев свидетельствует об их автохтонном формировании.

На юге и в центральной части обнажения торф перекрывает толща палевых параллельнослоистых супесей. Ее подошва в южной части обнажения залегает на высоте 5-8 м над уровнем моря, а в центральной части понижается и, по данным бурения, уходит под уровень моря не менее, чем на -1,5 м, общая мощность достигает 9 м. Супеси отличаются параллельной горизонтальной слоистостью, подчеркнутой буроватыми прослоями более тонкого материала. Супеси незасоленные, по гранулометрическому составу состоят преимущественно из частиц крупноалевритовой размерности и тонкого песка, однако содержат и глину. В большей части образцов супесей микрофоссилий не обнаружено, а в остальных присутствуют лишь единичные створки вымерших палеогеновых диатомей *Paralia grunowii* Gles, неопределимые обломки створок морских центрических диатомей и спикулы губок. В толще супесей встречаются редкие линзы торфа и суглинистого материала с обломками веточек до 0,3 м длиной, а также небольшие фрагменты древесины. Их радиоуглеродный возраст составляет 8350 ± 100 (ЛУ-7970), 8270 ± 90 (ЛУ-8229) и 8920 ± 90 (ЛУ-7973) лет соответственно. Параллельная ненарушенная слоистость, отсутствие засоленности и переотложенные линзочки торфа позволяют

предположить, что слой 3 имеет озерное происхождение, а датировки торфа и древесины - что он сформировался в атлантическом периоде голоцена.

Венчают разрез бурые неявнослоистые суглинки и супеси с криотурбациями. По гранулометрическому составу это преимущественно алевроиты с примесью тонкого песка и глины. Они не засолены, микрофоссилий в них обнаружено не было. Это покровные отложения, сформировавшиеся в конце голоцена. Суглинки перекрыты слоем дернины с корнями растений.

Таким образом в районе полуострова Явай, в отличие от острова Белого, повышения уровня моря в голоцене не происходило: нами здесь была описана толща озерных отложений, датирование торфа в которых показало возраст от 8 до 9 тыс. радиоуглеродных лет. Соответственно, в пределах севера Западно-Сибирской плиты изменения относительного уровня моря в голоцене были несинхронны; уровень моря находился на разной высоте на соседних участках. Это свидетельствует о том, что вертикальные движения земной коры оказали значительное влияние на северную часть Ямала и Гыдана в голоцене, что подтверждает разброс величин изменения относительного уровня моря по литературным данным

Заключение

Проанализированы литературные и собственные полевые данные об изменениях относительного уровня Карского моря за последние тысячелетия. Установлено, что, при общем подъеме уровня моря со времени максимума последнего оледенения, существовали различия между соседними блоками земной коры. В то время, как на шельфе Карского моря уровень, вероятно, рос со значительной скоростью в течение всего голоцена, на острове Белом произошло небольшое повышение уровня моря в середине голоцена. На полуострове Явай такого повышения в голоцене не наблюдалось.

Исследование проведено при поддержке проекта РФФИ 20-35-70002.

Литература

1. Carson, M., Köhl, A., Stammer, D., Slangen, A. B. A., Katsman, C. A., Van de Wal, R. S. W., ... & White, N. (2016). Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climatic Change*, 134(1-2), 269-281.

2. Rose, S. K., Andersen, O. B., Passaro, M., Ludwigsen, C. A., & Schwatke, C. (2019). Arctic Ocean Sea Level Record from the Complete Radar Altimetry Era: 1991–2018. *Remote Sensing*, 11(14), 1672.
3. Climate Change 2014: Synthesis Report, 2014. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 151, ISBN 978-92-9169-143-2.
4. Lamoureux, S., Forbes, D. L., Bell, T., Manson, G. K., Rudy, A. C. A., Lalonde, J., ... & Whalen, D. J. R. (2015). . The Impact of Climate Change on Infrastructure in the Western and Central Canadian Arctic. *FROM SCIENCE TO POLICY IN THE WESTERN AND CENTRAL CANADIAN ARCTIC*, 301.
5. Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., & Wood, R. M. (2011). Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. *Climatic change*, 104(1), 113-137.
6. Peltier, W.R., 2004. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32, 111-149.
7. Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A., Sun, Y., & Sambridge, M., 2014. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(43), 15296-15303.
8. Steffen, H., & Wu, P. (2011). Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia—a review of data and modeling. *Journal of geodynamics*, 52(3-4), 169-204.
9. Engelhart, S.E., B.P. Horton, and A.C. Kemp, 2011. Holocene sea level changes along the United States' Atlantic Coast. *Oceanography*, Vol. 24, Ed. 2, 70–79, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2011.28>.
10. Engelhart, S.E., Horton, B.P., 2012. Holocene sea level database for the Atlantic coast of the United States. *Quat. Sci. Rev.*, Vol. 54, 12-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.09.013>.
11. Gehrels, W.R., Milne, G.A., Kirby, J.R., Patterson R.T., Belknap D.I.F., 2004. Late Holocene sea-level changes and isostatic crustal movements in Atlantic Canada. *Quaternary International*, 120, 79–89.

12. Roy, K., Peltier, W.R., 2017. Space-geodetic and water level gauge constraints on continental uplift and tilting over North America: Regional convergence of the ICE-6G C (VM5a/VM6) models . *Geophysical Journal International*, 210(2), 1115-1142

13. Vink, A., Steffen, H.,L, Reinhard, L., Kaufmann, G., 2007. Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea). *Quat. Sci. Rev.*, Vol. 26, 3249–3275

14. Баранская А.В., Романенко Ф.А., Арсланов Х. А., Максимов Ф.Е., Старикова А.А., Пушина З.В. Стратиграфия, возраст и условия формирования многолетнемерзлых отложений острова Белый // *Криосфера Земли*, 2018, т. XXII, № 2, с. 3–15

15. Гусев Е.А., Аникина Н.Ю., Арсланов Х.А., Бондаренко С.А., Деревянко Л.Г., Молодьков А.Н., Пушина З.В., Рекант П.В., Степанова Г.В. Четвертичные отложения и палеогеография острова Сибирякова за последние 50 000 лет // *Известия русского географического общества*. 2013. Том 145. № 4. С. 65-79.

16. Баранская А.В., Романенко Ф.А., Арсланов Х.А., Петров А.Ю., Максимов Ф.Е., Пушина З.В., Тихонов А.Н., Демидов Н.Э. Верхнечетвертичные отложения Гыдана и арктических островов: реконструкция относительного уровня Карского моря в связи с вертикальными движениями земной коры за последние 50 тысяч лет // *Вестник Московского Университета. Серия 5. География*. 2018. № 6, с. 56-71

ИТОГИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ЧАРЕ 2005-2019 г.г.: СОСТОЯНИЕ И ДИНАМИКА ГОРНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Сергеев Д.О.¹

¹Институт геоэкологии РАН, Москва, Россия; sergueevdo@mail.ru

Проанализированы состояние и динамика геотемпературного режима горных пород в различных ландшафтных и высотных зонах Чарской котловины и хребта Удокан (Северное Забайкалье). Показаны неоднозначность реакции температурного режима на климатические изменения и значение различных типов теплообмена в грунтах (включая водную и воздушную конвекцию).

PERMAFROST MONITORING IN CHARA REGION IN 2005-2019: PERMAFROST
STATE AND PERMAFROST DYNAMICS

Sergeev D.O.¹

¹Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow, Russia; *sergeevdo@mail.ru*

The state and dynamics of the geothermal regime of rocks in various landscape and high-altitude zones of the Chara basin and the Udokan ridge (Northern Transbaikalia) are analyzed. The ambiguity of the reaction of the temperature regime to climatic changes and the importance of various types of heat transfer in soils (including water and air convection) are shown.

Район исследований относится к Северному Забайкалью и включает в себя Чарскую межгорную котловину рифтового типа и обрамляющие её горные хребты Удокан и Кодар, абсолютные высоты которых достигают соответственно 2200 и 3000 м. Днище котловины имеет абсолютные отметки около 700 м. Котловина заполнена преимущественно песками ледникового и водно-ледникового происхождения, причём мощность четвертичных отложений достигает 1 км. Тектоническое строение территории носит блоковый характер. Глубинный тепловой поток весьма изменчив по территории [1], что, совместно со сложной геокриологической историей, связанной с оледенениями и развитием подпрудных ледниковых озёр, обусловило неоднородности мощности многолетнемерзлых толщ (ММТ). В пределах Чарской котловины описаны как обширные участки без многолетней мерзлоты (урочище Пески), так и аномальные мощности ММТ, достигающие 450 м [2]. Под водораздельными участками горных хребтов мощности ММТ достигают 900 м [3]. Температура горных пород на глубине проникновения сезонных колебаний в районе исследований также весьма изменчива в разных ландшафтах, меняясь от -7 до +2°C [4].

Климат в районе исследования в целом теплее на протяжении последних шестидесяти лет (рис. 1а), хотя на фоне общего тренда отчётливо выделяется период относительного похолодания с 1989 по 2003 г.г. (осреднение среднегодовых температур проводилось с сентября по август). Континентальность климата за этот период снизилась. Оценка линейных трендов за последний тридцати- и пятнадцатилетний периоды также

говорит о тенденции регионального потепления. Атмосферные осадки за период метеорологических наблюдений также демонстрируют тенденцию их роста как в тёплый, так и в холодный период года, которая в последнее десятилетие сменилось относительным иссушением (рис. 1б). Организация микроклиматических наблюдений на участках геокриологического мониторинга позволила подтвердить ранее выявленные ландшафтные и высотно-поясные микроклиматические закономерности [5]. В частности, в днищах межгорных котловин зимой развивается инверсия, потолок которой проводит на высотах 1000-1200 м. Выше потолка инверсии наблюдается нормальная климатическая поясность. С высотой растёт количество осадков, толщина снежного покрова (с 0.15-0.3 м в котловинах и до 2-3 м в верхнем поясе гор), сила ветра.

Микроклиматические режимные наблюдения ИГЭ РАН позволили убедиться в синхронности региональных климатических тенденций на разных участках территории (рис. 2).

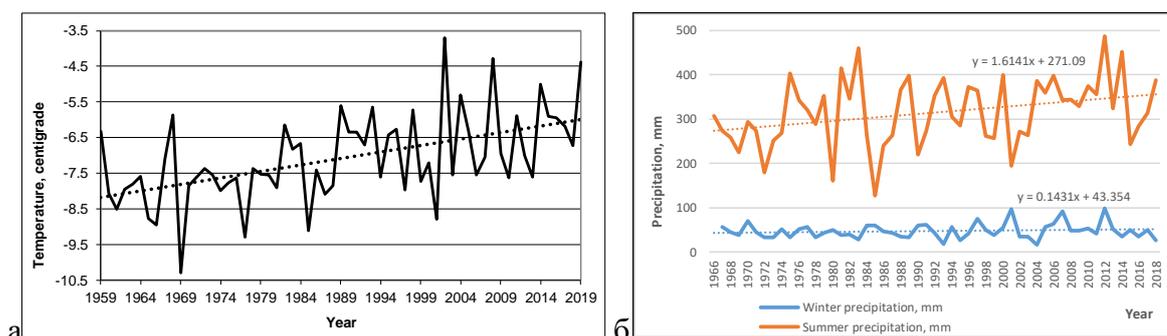


Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры воздуха (а) и атмосферных осадков (б). Метеостанция Чара.

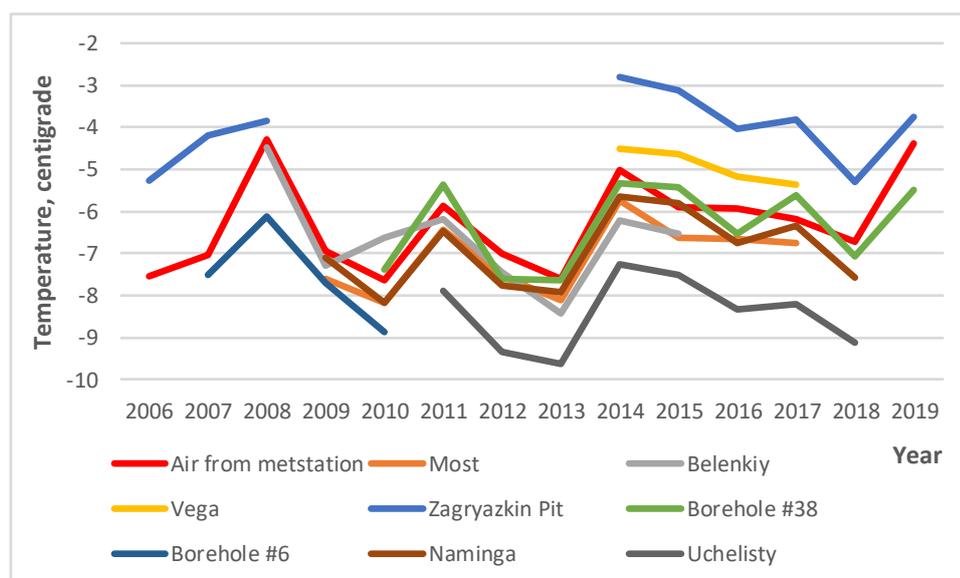


Рис. 2. Микроклиматическое разнообразие динамики среднегодовой температуры воздуха в пределах территории исследований на разной абсолютной высоте: Air from metstation – с.Чара, 709 м; Most – центральная часть Чарской котловины, 700 м; Belenkiy – юго-восточная оконечность котловины, 728 м; Vega – северо-западная оконечность котловины, 805 м; Zagryazkin Pit – хр. Удокан, долина руч.Клюквенного, верхняя граница зимней инверсии, 1155 м; Borehole #38 – хр. Удокан, водораздел Клюквенный-Эмегачи, 1464 м; Borehole #6 – хр. Удокан, склон восточной экспозиции, 1712 м; Naminga – хр. Удокан, метеостанция Наминга, 1510 м; Uchelisty – хр. Удокан, водораздельная седловина, 1640 м.

Участки экологического мониторинга расположены в пределах Чарской котловины, на её предгорьях и в горной части хребта Удокан. В средней части Чарской котловины вблизи на открытом заболоченном кочкарнике расположен участок Мост, включающий 20-м скважину и комплект площадок для наблюдения температуры поверхности на кочках и между ними. Наблюдения здесь были организованы ПГО «Читагеология» в 1989 году. На 20-метровой глубине с 1990 по 2008 г.г. потеплело на 0,8°C. После 2008 г. началось монотонное падение температуры до с -4,8 до -5,3°C в 2012 г. На коротком отрезке времени эта динамика сонаправлена с динамикой температур поверхности и противоположна общему ходу среднегодовых температур воздуха и в результате, несмотря на драматические климатические события последних 30 лет, температурное состояние многолетнемёрзлых пород кажется неизменным.

Другой участок наблюдений в центральной части Чарской котловины расположен в знаменитом урочище «Пески»: восьмикилометровом массиве эоловых песков, подстилаемых водноледниковыми водонасыщенными галечниками. Многолетней мерзлоты здесь нет, среднелетняя температура пород на глубине 15 м составляет плюс 2

градуса, а на подошве слоя сезонного промерзания наблюдается слабый рост среднегодовых температур (рис. 3).

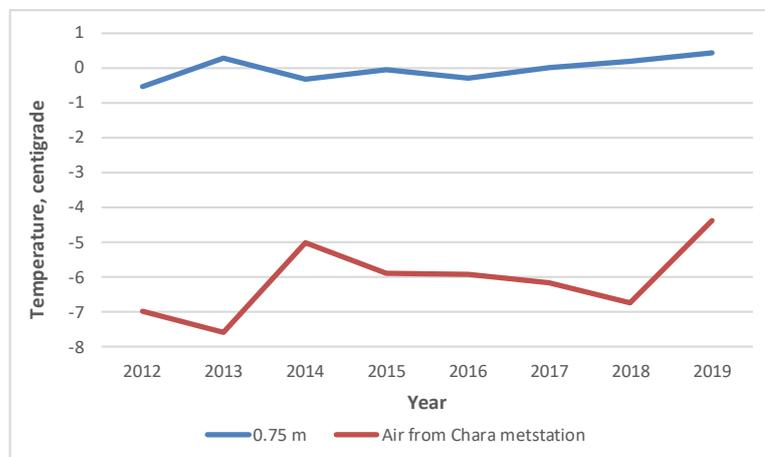


Рис. 3. Изменения среднегодовой температуры пород в сравнении с ходом среднегодовой температуры воздуха (участок Пески).

Участок Беленький расположен в краевой юго-восточной части Чарской котловины на границе террасы р.Чары и предгорных шлейфов хребта Удокан, сложенных преимущественно песками. Участок представлен слабо заболоченной поверхностью, с листовенничным 15-20-летним подростом на месте гари. Среднегодовая температура поверхности и слоя сезонного оттаивания демонстрирует устойчивую тенденцию похолодания на протяжении последних 8 лет с постепенным сокращением амплитуды сезонных колебаний (рис. 4, 5). На тех же глубинах, где измеряется температура, одновременно регистрируется объёмная влажность грунтов.

Мониторинг позволяет убедиться в неоднозначной реакции температуры грунтов на климатические осцилляции: аномалии среднегодовых температур грунта как положительного, так и отрицательного знака не совпадают с аномалиями температуры воздуха и толщины снежного покрова (рис. 5).

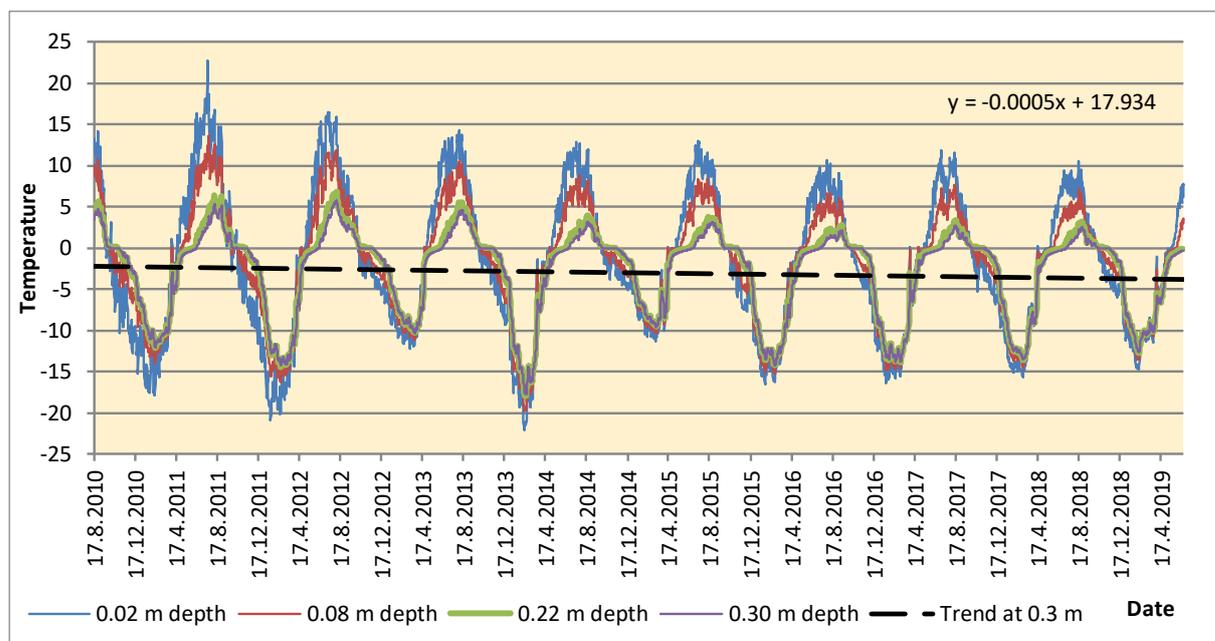


Рис. 4. Изменения среднесуточной температуры пород на разных глубинах на участке Беленький.

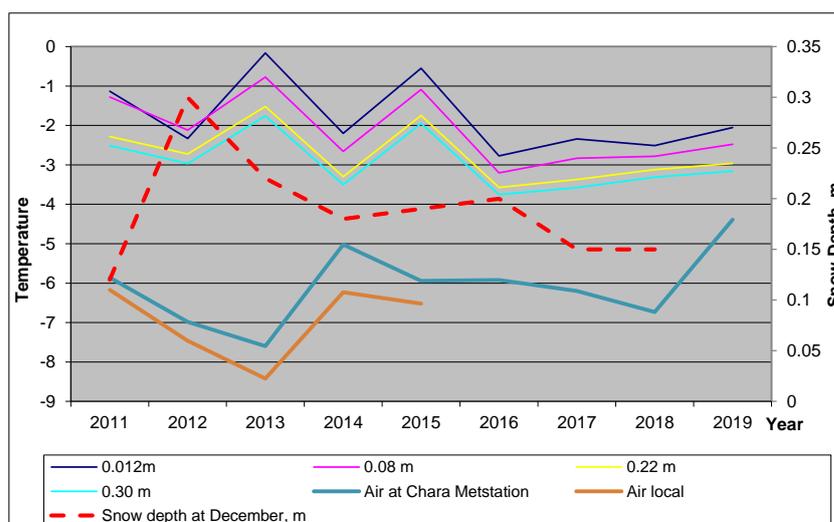


Рис. 5. Изменения среднегодовой температуры пород и воздуха (по левой вертикальной оси) в сравнении с толщиной снежного покрова (по правой вертикальной оси) на участке Беленький.

Участок Вега расположен на конечной морене Среднего Сакукана на северо-западной окраине Чарской котловины и также демонстрирует тенденцию относительного похолодания температуры горных пород на протяжении последних шести лет. С 1990 года температура на глубине проникновения сезонных колебаний здесь изменилась незначительно (рис. 6). Мощность ММТ пород здесь, по-видимому, не превышает 35-40 м

из-за подстилающей толщи галечников со значительными запасами воды (Среднесауканское месторождение подземных вод).

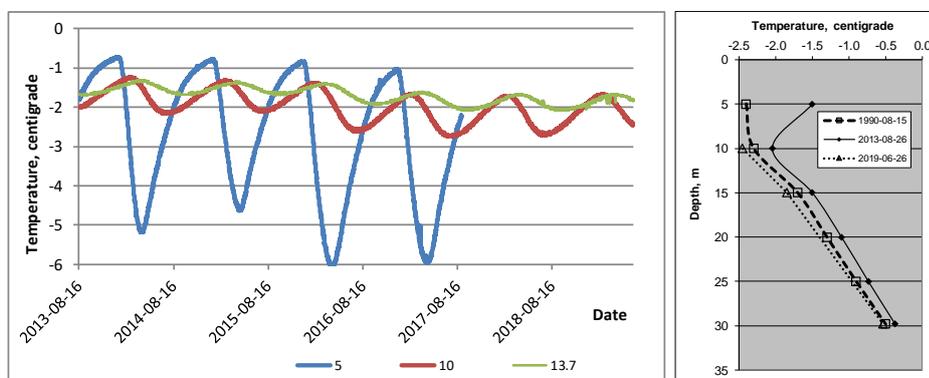


Рис. 6. Изменения среднегодовой температуры пород на разных глубинах на участке Вега.

С ростом абсолютной высоты всю большую долю поверхности склонов занимают курумы и другие крупнообломочные отложения, лишённые мелкодисперсного заполнителя. В таких отложениях реализуются дополнительные механизмы теплообмена (воздушная конвекция и радиационный перенос тепла от обломка к обломку), а также протекают интенсивные процессы испарения и конденсации.

В курумах нами наблюдаются температуры и влажность воздуха в поровом пространстве крупнообломочного чехла в специальном шурфе, вырытом сотрудниками экспедиции БАМ кафедры геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова в 1986 г. в 30 м от скважины №37. Шурф был оборудован для режимных наблюдений по рекомендациям Д.Д.Загрязкина. За прошедшие 30 лет глубина деятельного слоя возросла с 2,05 до 2,20 м; температура горных пород также выросла на 0,6°С (рис. 7).

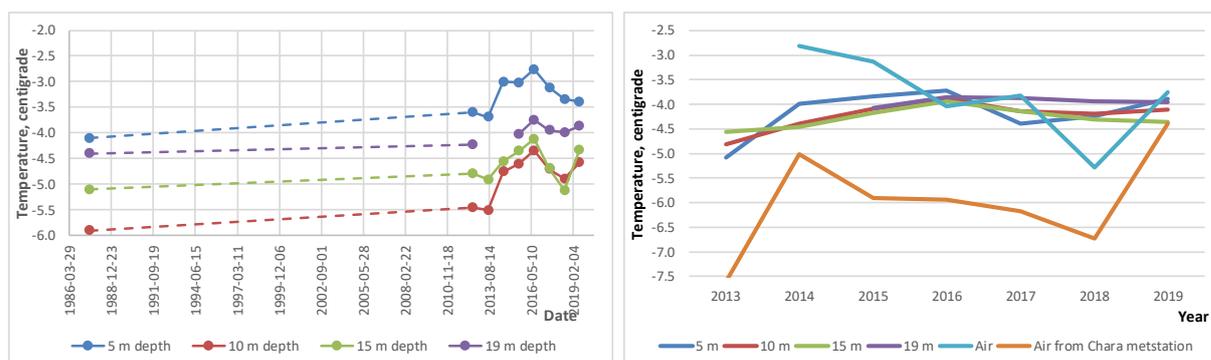


Рис. 7. Изменения среднегодовой температуры пород на разных глубинах в верхнем течении ручья Клюквенного (скважина №37).



Рис. 8. Изменения среднегодовой температуры воздуха и горных пород на разных глубинах в деятельном слое на склоне западной экспозиции в верхнем течении ручья Клюквенного (шурф Загрязкина).

Скважина №38 расположена на высоте 1464 м на водораздельной поверхности, покрытой глыбовыми развалами и каменными кольцами. Здесь также наблюдается тенденция современного потепления многолетнемёрзлых пород, близкое к темпам потепления курумов на склонах. Температура горных пород на глубине проникновения сезонных колебаний здесь выросла за 30 лет на 0,9°C.

Участок Ущелистый расположен на водораздельной седловине на высоте 1640 м, выполненной супесчаными элювиальными и делювиальными отложениями. Здесь мы также наблюдаем постепенное повышение температуры горных пород в деятельном слое, которое сонаправлено потеплению климата (рис. 9).

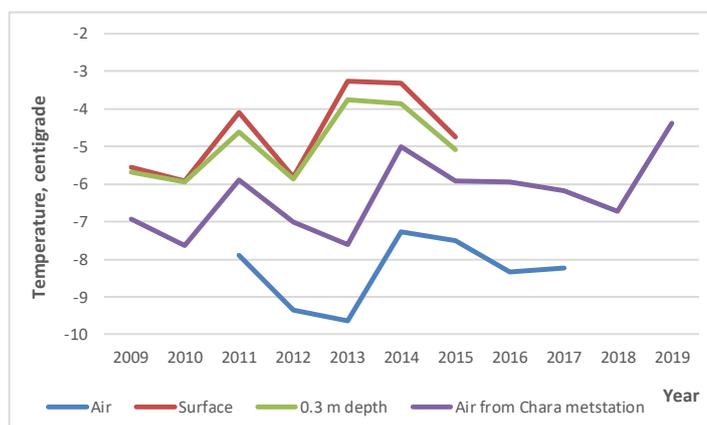


Рис. 9. Изменения среднегодовой температуры воздуха, поверхности и горных пород на подошве деятельного слоя на участке Ущелистый.

Заключение

Таким образом, благодаря продолжающемуся геокриологическому мониторингу удалось сделать три важных вывода:

- 1) региональные климатические тенденции синхронны на разных участках территории и в различных высотных поясах гор Северного Забайкалья;
- 2) горная часть хребта Удокан демонстрирует современное потепление приповерхностных горизонтов многолетней мерзлоты, которое, в целом, сонаправлено с региональным потеплением климата;
- 3) межгорные котловины характеризуются современным относительным похолоданием приповерхностной части массивов многолетнемерзлых пород, что не совпадает с климатическими тенденциями.

Литература

1. Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока (2009–2015) / [Электронный ресурс] Дучков А.Д. и др., Новосибирск, 2015. URL: <http://maps.nrcgit.ru/geoterm/map.ru>
2. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона Юго-Востока Сибирской платформы / Дисс. на соискание уч. степени доктора геол.-мин. наук. Якутск, 2002, 337 с.
3. Шасткевич Ю.Г. Многолетнемерзлые породы высокогорной части хребта Удокан и условия формирования их температурного режима / Геокриологические условия Забайкальского Севера, Новосибирск, Наука, 1966, с. 24-43.
4. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона Юго-Востока Сибирской платформы / Новосибирск: Наука, 2005, 227 с.
5. Караушева А.И. Климат и микроклимат района Кодар-Чара-Удокан / Л.: Гидрометиздат, 1977, 125 с.

**ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЙ СУБАКВАЛЬНОГО КРАСНОЯРСКОГО
ОПОЛЗНЯ (ОЗ. БАЙКАЛ)**

Кудаев А.А.

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

a.a.kudaev@gmail.com

Красноярский подводный оползень имеет тесную связь с областью сипов мыса Красный Яр, которая расположена рядом с ним. Были предприняты попытки выяснить основные взаимосвязи между газонасыщенностью грунтов и происхождением этого оползня. В настоящее время ведутся лабораторные эксперименты по созданию инструмента для распознавания подводных склонов с высоким риском развития нестабильных процессов.

**EXPERIENCE OF STUDYING OF THE KRASNOYARSKIY SUBAQUEOUS
LANDSLIDE (THE LAKE BAIKAL)**

Kudaev A.A.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; a.a.kudaev@gmail.com

The Krasnoyarskiy subaqueous landslide has a strong relation with the Krasniy Yar seepage area which situated nearby this. There were undertaken some ways to find the main relationship between gas saturation of soils and landslide origin. Nowadays, conducting a few experiments to creating the tool for recognizing submarine slopes with high risks of instability processes development.

Субаквальный оползень, названный впоследствии «Красноярский», был обнаружен в 2009 году у подошвы склона авандельты реки Селенга по результатам батиметрической съемки многолучевым эхолотом в рамках исследований по Программе РАН 17.8 (2009) и проекту FWO Flanders (1.5.198.09). Систематическое изучение оползня началось в 2015 году [1] и осуществляется в течении четырех лет в рамках проекта Class@Baikal. В трех экспедициях получен обширный материал - сейсмоакустические профили (54 км), станции донного геологического опробования ударной трубкой (75 станций).

Объект интересен с точки зрения, как нефтегазовой геологии, так и инженерной геологии.

С позиций нефтегазовой геологии, в частности геохимической съёмки на акваториях, объект приурочен к гидратоносному сипу, расположенному у подножия оползня «Красный Яр», состоящий из нескольких участков развития процессов фокусированной разгрузки углеводородных газов в водную толщу, маркируемые приповерхностными газовыми гидратами. Изотопный анализ углерода метана газовых гидратов показал, что осадки в пределах сипа вмещают газ смешанного происхождения, вероятно частично мигрировавшего из более глубоких скоплений углеводородов в осадочной толще озера.

С точки зрения инженерной геологии изучение причин и условий формирования Красноярского оползня позволяет сформулировать методику прогнозирования георисков, поскольку оползень является удачным примером современных геологических явлений, которые могут встретиться при осуществлении инженерно-хозяйственной деятельности на акваториях.

Совокупное изучение объекта методами, относящимися к разным направлениям геологии, позволяет сформулировать мультидисциплинарный подход к изучению субаквальных оползней. Это может привести к более полному пониманию подобных геологических процессов и более точно учитывать факторы их формирования.

За время изучения сипа Красного Яра и Красноярского оползня был изучен аномальный тепловой поток, восходящий к поверхности дна озера из более глубоких толщ осадочного заполнения озера и связанные с ним геохимические аномалии поровых вод [4]. Кроме того, в отложениях нарушенных оползанием и среди осадков, зоны фокусированной разгрузки, при помощи метода компьютерной томографии, были обнаружены каналы миграции флюидов, характерные для газонасыщенных осадков озера Байкал [2].

Для характеристики прочностных свойств грунтов в пределах оползня и его периферии были проведены полевые измерения прочности на сдвиг микрокрыльчаткой и сопротивление грунта нормальным нагрузкам ручным пенетрометром [3]. Таким образом, было получено предварительное распределение прочности грунтов, несущее в себе скорее качественные, нежели количественные характеристики.

Для аналитической характеристики грунтов были отобраны несколько станций керн (герметично упакованных) и в дальнейшем отправлены в лаборатории МГУ. Для двух

станций были проведены испытания сопротивлению одноосному сдвигу. Полученные данные были использованы в математическом моделировании устойчивости склонов в программе GeoStab. Основой моделирования служила зависимость угла внутреннего трения (ϕ) от газонасыщенности осадков, описанная в докторской работе Уиллера [5]. В результате моделирования оказалось, что при снижении ϕ у ненарушенных оползанием осадков на 1.5° , коэффициент устойчивости склона становится меньше 1.

Однако то, какому именно количеству газа, содержащемуся в осадке, соответствует значение изменения ϕ для байкальских субаквальных грунтов не было установлено ни эмпирически, ни теоретически. С этой целью в настоящее время проводится серия испытаний и экспериментов в лаборатории ИГЭ РАН и МГУ имени М.В. Ломоносова.

В первую очередь ведутся испытания грунтов сопротивлению одноосному сдвигу с измерением эффективного порового давления при разрушении сплошности грунта. Это позволяет приблизиться к условиям субаквальной среды грунтов.

Параллельно с этим ведутся эксперименты с созданием пасты из сухого грунта и снега. Создание такой пасты позволяет воссоздать пустотное пространство искусственного грунта, имитирующее заполнение газом в пузырьковой фазе. Паста делается с таким соотношением, чтобы плотность образцов была меньше, чем естественная.

Таким образом, целью разностороннего подхода к изучению объекта является создание методических основ изучения субаквальных грунтов в районах фокусированной разгрузки углеводородов и прогнозирования развития склоновых процессов, представляющих риски при строительстве под водой.

Заключение

Стоит отметить, что объект исследований не только интересен, потому что включает в себя сразу несколько природных явлений, но и удобен для исследований. Озеро Байкал – современный развивающийся рифтовый бассейн, в пределах которого встречаются осадочные тела, как с высокой, так и низкой скоростью седиментации. Озеро, относительно других акваторий, – не крупное, но в его пределах развито множество различных современных геологических процессов. Подобные процессы встречаются, в частности, на акваториях Арктического региона, который на сегодняшний день является наиболее перспективным для развития нефтегазовой индустрии, подразумевающей и поиски углеводородов и субаквальную инженерную деятельность.

Литература

1. Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М. и участники TTR-Class@Baikal-2015 (2015) Проект Glass@Baikal: развивая традиции Международной программы "Обучение-через-исследования (Плавучий Университет)" // Сб.: Труды IV Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU)". – М.: Феория, 2015. – С. 29-33
2. Кудаев А. А., Корост Д.В., Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М. (2017а) Аутигенная минерализация в зонах фокусированной разгрузки углеводородов озера Байкал // В сб. Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10-14 апреля 2017 г. [Электронный ресурс]. – Москва: ИО РАН – 2017. – С. 478-479.
3. Кудаев А.А., Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М., Корост Д.В. (2017б) Характеристика донных грунтов в зонах фокусированной разгрузки углеводородов озера Байкал // Материалы докладов XIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». – 2017. – С. 636-639.
4. Pogodaeva T.V., Poort J., Aloisi G., Bataillard L., Makarov M.M., Khabuev A.V., Kazakov A.V., Chensky A.G., Khlystov O.M. Fluid migrations at the Krasny Yar methane seep of Lake Baikal according to geochemical data //Journal of Great Lakes Research. – 2019.
5. Wheeler S. J. The stress-strain behaviour of soils containing gas bubbles. – 1986.

**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА
ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ**

Прокопюк И.В.¹, Кривов Д.Н.¹, Шевчик Ф.А.²

¹ ООО «РУСГЕОТЕХ», Россия, e-mail: <https://www.rgtekh.ru>;

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, e-mail: <https://www.msu.ru>

Криолитозона широко распространена на всех континентах, при этом глобальное изменение климата оказывает огромное воздействие на формирование и динамику мерзлых толщ. Для оценки его последствий, накладывающихся на интенсивный техногенез, наиболее информативными являются данные мониторинга температурного режима грунтов. ООО «РУСГЕОТЕХ» разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий в автоматизированном режиме измерять температуру многолетнемерзлых грунтов, что позволит существенно повысить эффективность геотехнического мониторинга благодаря непрерывному контролю состояния исследуемых объектов.

MODERN APPROACHES TO MONITORING THE TEMPERATURE OF
PERMAFROST SOILS

Prokopyuk I. V.¹, Krivov D. N.¹, Shevchik F.A.²

¹LLC «RUSGEOTEKH», Russia, e-mail: <https://www.rgtekh.ru>;

²Lomonosov MSU, Russia, e-mail: <https://www.msu.ru>.

Permafrost is widespread on all continents, and global climate change has a huge impact on the formation and dynamics of frozen strata. To assess the effects of global climate change, together with intensive technogenesis, the most informative data are monitoring the temperature regime of soils. LLC «RUSGEOTEKH» has developed a software and hardware system that allows automated monitoring of the temperature of permafrost soils, which will significantly increase the efficiency of geotechnical monitoring due to continuous controlling of the state of objects.

Введение

Криолитозона широко распространена на всех континентах земного шара. Она распространена на 65% территории Российской Федерации (рис. 1), 50 % Канады, 60 % Аляски, 65 % Монголии и 22 % территории Китая. Всего мерзлые породы занимают около 36 млн. км², что составляет около 25 % от всей площади суши земного шара [5].



Рис. 1. Границы распространения многолетнемерзлых пород в Российской Федерации [1].

Глобальное изменение климата оказывает огромное воздействие на формирование и динамику мерзлых толщ. Наибольший практический интерес к исследованиям последствий влияния изменений климата в области распространения многолетнемерзлых пород связан с тем, что в макрорегионе залегает более четверти мировых запасов углеводородов. Сейчас темпы и интенсивность освоения Арктики возрастают, а проектирование и строительство сооружений нефтегазового комплекса требует изучения инженерно-геологических условий, прогноза последствий освоения, а также овладения набором возможных технических решений по применению инженерной защиты данных территорий [4].

Под воздействием различных видов хозяйственного освоения криолитозоны все или отдельные компоненты природной среды, включающей в себя и геокриологические условия, изменяются, что приводит к преобразованиям всего природного комплекса.

Это проявляется в изменении состава, строения и свойств мерзлых пород, их прочности, несущей способности и сжимаемости, напряжений и деформаций пучения и осадки в промерзающих и протаивающих грунтах, интенсивности развития термоэрозии, термокарста, солифлюкции и других опасных криогенных процессов и явлений.

В настоящее время многолетнемерзлые породы, особенно в зоне их сплошного распространения, достаточно устойчивы, но потепление климата в будущем, накладывающееся на интенсивный техногенез, представляет серьезную опасность для функционирования природно-технических систем севера. В области наибольшего геокриологического риска входят Чукотка, бассейны верхнего течения Индигирки и Колымы, юго-восточная часть Якутии, значительная часть Западно-Сибирской равнины, побережье Карского моря, Новая Земля, а также часть островной мерзлоты на севере европейской территории. В этих районах имеется развитая инфраструктура, в частности газо- и нефтедобывающие комплексы, система трубопроводов Надым-Пур-Таз на северо-западе Сибири, Билибинская атомная станция и связанные с ней линии электропередач от Черского на Колыме, до Певека на побережье Восточно-Сибирского моря [4].

При оценке геокриологических последствий потепления климата наиболее информативными являются данные мониторинга криолитозоны.

Геотехнический мониторинг на многолетнемерзлых грунтах – это система изучения, прогноза, контроля и управления, оценки мерзлотных, геологических и гидрогеологических условий, основанная на комплексе повторных натуральных наблюдений за состоянием грунтов основания под влиянием человеческой деятельности. Целью мониторинга на многолетнемерзлых грунтах является обеспечение надежной безаварийной эксплуатации хозяйственных объектов и защиты окружающей их природной среды на основе максимально возможного сохранения исходных мерзлотно-геологических условий [2].

С целью накопления информации о геокриологической среде, осуществления геокриологических прогнозов, разработки мер контроля и управления параметрами криолитозоны, необходимо проводить постоянные наблюдения на всей территории развития многолетнемерзлых пород. Это становится возможным при внедрении автоматизированной системы изучения состояния геологической среды в криолитозоне и создании постоянной наблюдательной сети опорных пунктов и специальных геотермических скважин [2].

Сегодня геотехническому мониторингу объектов, возводимых в условиях криолитозоны, не уделяется должного внимания. Заказчики строительства самостоятельно определяют необходимость проведения мониторинга, а также его периодичность и объем, зачастую пренебрегая требованиями нормативно-технических документов [3]. Поэтому для

реализации стратегических проектов, в настоящее время, все более актуальным становится внедрение современных автоматизированных решений, которые позволяют: оперативно, в нужный момент времени, получить максимально полную информацию о текущем состоянии объекта и обеспечить своевременной, достоверной и актуальной информацией о состоянии многолетнемерзлых грунтов, а также о возможности появления и развития опасных геологических и экзогенных геокриологических процессов.

Новые технологии.

Одним из основных факторов, влияющих на динамику криогенных процессов в криолитозоне, на прочность и устойчивость грунтов оснований, а, следовательно, и на пространственную неизменность конструкций, является температура грунтов.

ООО «РУСГЕОТЕХ» разработан программно-аппаратный комплекс (система), позволяющий в автоматизированном режиме измерять температуру многолетнемерзлых и сезонно-талых грунтов.

Система состоит из термометрического оборудования (цифровые термокосы), устройств для сбора и передачи данных по беспроводным технологиям и программного обеспечения для организации единой базы данных температурных наблюдений (рис. 2).

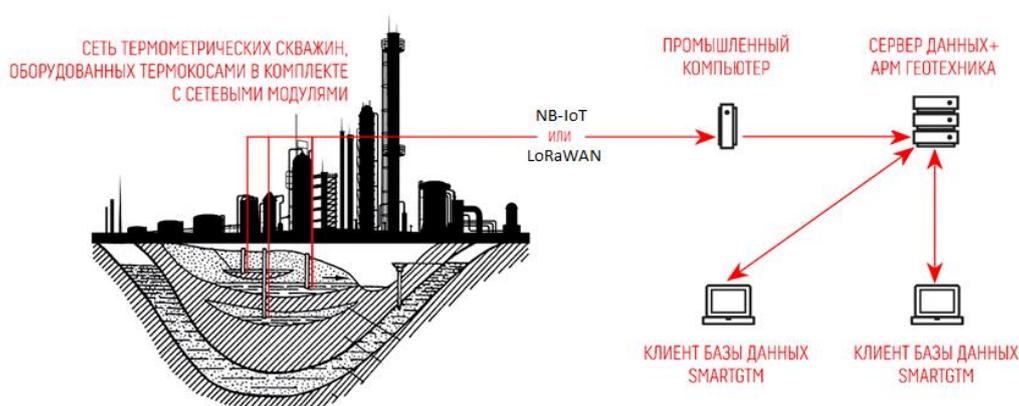


Рис. 2. Принципиальная схема организации системы автоматизированного мониторинга температуры грунтов

Дистанционный сбор/передача данных организован с использованием беспроводных технологий NB-IoT и/или LoRaWAN. Это энергоэффективный стандарт передачи небольших по объему данных на дальние расстояния, разработанный для сетей Интернета вещей. В отличие от сетей мобильной связи (GSM, 3G, 4G), сети стандарта NB-IoT и LoRaWAN имеет более высокую дальность покрытия и потребляет меньше энергии. При этом идеология Интернета вещей направлена на повышение эффективности за счет автоматизации процессов в различных сферах деятельности, в том числе мониторинга, исключая человека.

Алгоритм работы системы следующий: информация о температуре грунта, полученная термокосой, регистрируется автономным устройством для сбора и передачи данных, и посредством беспроводных технологий по сети NB-IoT и/или LoRaWAN передается на удаленный сервер с предустановленной базой данных SmartGTM.

SmartGTM с функцией автоматизированного импорта данных с цифровых автономных устройств обеспечивает накопление полученной информации, ее обработку, анализ и визуализацию, с построением графиков изменения температуры и деформаций, и прогнозированием ситуации.

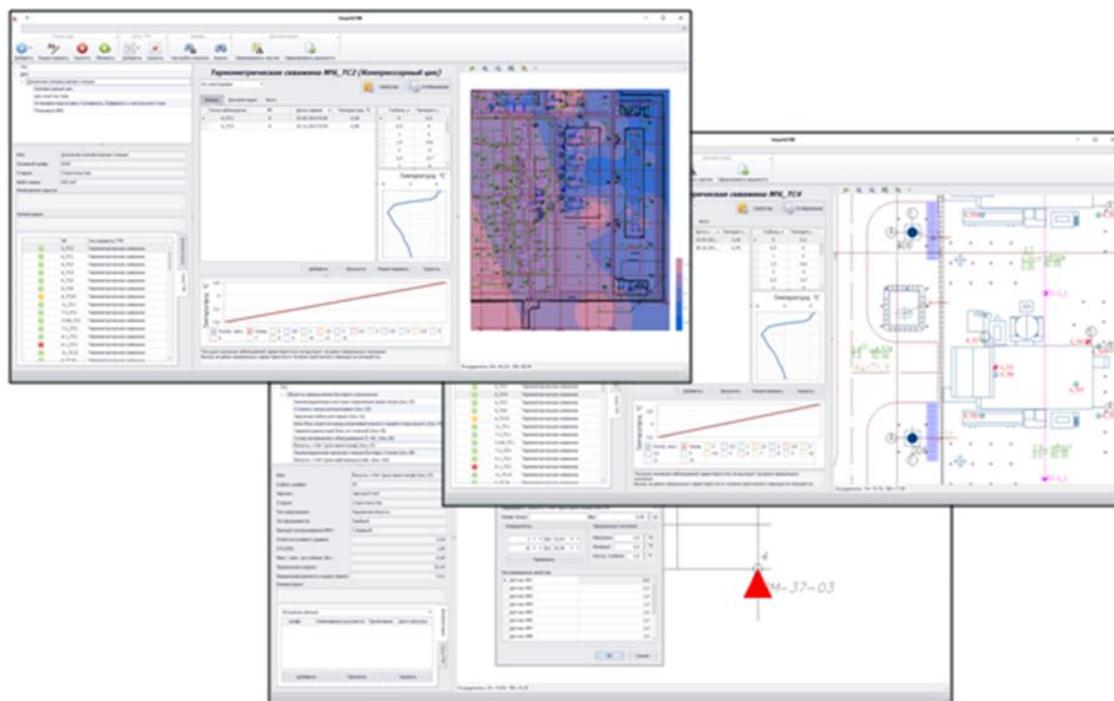


Рис. 3. Интерфейс базы данных SmartGTM

Беспроводные технологии сбора/передачи данных NB-IoT и LoRaWAN позволяют организовать систему автоматизированного мониторинга температуры грунтов на любом площадном или линейно-протяженном объекте.

Заключение

Как правило, наблюдения за состоянием грунтов оснований зданий и сооружений выполняются вручную. Частота наблюдений регламентирована: в период строительства – один раз в месяц, в период эксплуатации – не чаще двух раз в год. Очевидно, что временные рамки наблюдений слишком велики, чтобы своевременно выявить активизацию негативных процессов. А использование ручного метода сбора и обработки информации зачастую не обеспечивает требуемой точности и качества измерений, а также скорости принятия решения.

Внедрение средств автоматизации позволит существенно повысить эффективность геотехнического мониторинга благодаря непрерывному контролю состояния объектов мониторинга, своевременному выявлению тенденции мерзлых грунтов к растеплению, прогнозированию температурного режима грунтового массива, сокращению трудозатрат на проведение мониторинга, снижению рисков возникновения несчастных случаев при работе в экстремальных природно-климатических условиях.

Литература

- [1] Васильчук А.К. Сюрпризы «вечного льда» // Научная Россия, 2015.
- [2] Мельников П.И., Каменский Р.М., Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны // Вестник РАН. – 1993. – Т. 63. – №. 12. – С. 1090-1095.
- [3]. Попов А.П. Геотехнический мониторинг в криолитозоне. Экологическая или промышленная безопасность // Записки Горного института. – 2010. – Т. 188.
- [4]. Зворыкина Ю.В., Калабина М.В. О проявлениях глобальных изменений климата в Арктике // РЭЭ №5-6, 2019.
- [5]. Chang D., Lian J. Review of the influence of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of soil // University of Kansas, Lawrence. – 2013. – P. 65-70.

**ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ И ВЕЛИЧИНА СЕЗОННОГО ПУЧЕНИЯ НА
ТЕРРИТОРИИ ЗВЕНИГОРОДСКОЙ БИОСТАНЦИИ МГУ**

Уварова А.В.^{1,2}, Комаров И.А.¹, Тюрин А.И.¹, Исаев В.С.¹

¹ Московский Государственный Университет, кафедра геокриологии, 119991,
Москва, ГСП-2, Ленинские горы, *e-mail*: cryology@geol.msu.ru

² ГЕОХИ РАН, Лаборатория геохимии Луны и планет, 119991, Москва ул.
Косыгина, д.19 *e-mail*: aleksandra.uvarova.95@mail.ru

В данной работе описаны методики измерения температурного режима пород и вертикальных деформаций пучения. Приведены результаты температурного мониторинга и динамики пучения в период 2013 - 2018 на Звенигородской биостанции МГУ и кратко описаны основные выявленные закономерности. Также были рассмотрены расчетные методики определения величины пучения.

**THERMAL REGIME AND SEASONAL FROST HEAVE IN THE MSU
ZVENIGOROD BIOLOGICAL STATION AREA**

Uvarova A. V.^{1,2}, Komarov I. A.¹, Isaev V. S.¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, *e-mail*: cryology@geol.msu.ru

² Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS, Moscow, Russia,
e-mail: aleksandra.uvarova.95@mail.ru

This article has description of methods for thermal regime and vertical deformation of frost heave. The results of thermal monitoring and dynamic of frost heave for period 2013-2018 at the Zvenigorod biostation MSU are given and the main dependencies are described. Also, the calculation methods for determination of frost heave were considered.

Введение

Звенигородская биостанция МГУ является природным заказником в Подмосковье. Она расположена на правом берегу р. Москвы и охватывает разные геоморфологические элементы рельефа, такие как: пойма, надпойменные террасы, водораздел и овраги. На данной территории проводится мониторинг температурного режима, слоя сезонного промерзания и деформаций сезонного пучения.

Методы полевых исследований

Мониторинг пород проводился, используя термометрические скважины, расположенные на 1-й и 2-й террасах, где также измерялись величины деформации пучения со снятым растительным и снежным покровом. Скважины пробурены на глубину до 15 м, которая характеризует мощность слоя годовых амплитуд, и оборудованы пластиковыми кондукторами. В качестве температурных датчиков, расположенных с различным шагом по глубине, были использованы электрические датчики сопротивления, накопление данных за пять лет осуществлялось с помощью логгеров фирмы GeoPrecision GmbH (Германия) (рис. 1), которая может подключаться непосредственно к беспроводному мини-регистратору M-log5w-DALLAS или к I-log (с GPRS или без него) через адаптер SDI-12. [4].



Рисунок 1. Общий вид логгера и термокосы [1].

Методика опытного определения вертикальных деформаций пучения в целом аналогична той, которая описана в работе [2]. Пучиномеры были установлены в предзимний период времени дифференцированно по глубине, на отметках 0,10; 0,15; 0,25; 0,35 и 0,55 м. Они представляют собой металлическую пластину площадью 64 см^2 , к середине которой приварен металлический стержень (репер). Чтобы в процессе промерзания репер не смерзался с грунтом, он изолировался от него полихлорвиниловой трубкой, заполненной незамерзающей смазкой. Показания величин вертикальных деформаций пучения во времени снимаются относительно положения неподвижных реперов, установленных до начала зимнего периода на глубине ниже мощности слоя сезонного промерзания, которая для условий Подмоскovie составляет 1,7 м.

Методы расчетных исследований

Методики расчетного определения значений вертикальных деформаций пучения. Для сопоставления с опытными данными использовались результаты расчетов по двум методикам: хорошо известной и общепризнанной методике В. О. Орлова и методике института «ДорНИИ». Принципиальная разница заключается в том, что в последней, расчетные соотношения в явном виде содержат значения влагопроводных свойств пород, в то время как в первой их влияние опосредовано учитывается через комплекс характеристик грунта (число пластичности и т.д.) [5].

Результаты полевых опробований

Данные с термометрических кос обрабатывались в специальной программе GPS5W_Shell, с помощью которой можно преобразовать файлы с логов в массив данных и отобразить распределение температуры для каждого датчика в течение периода замера (рис. 2).

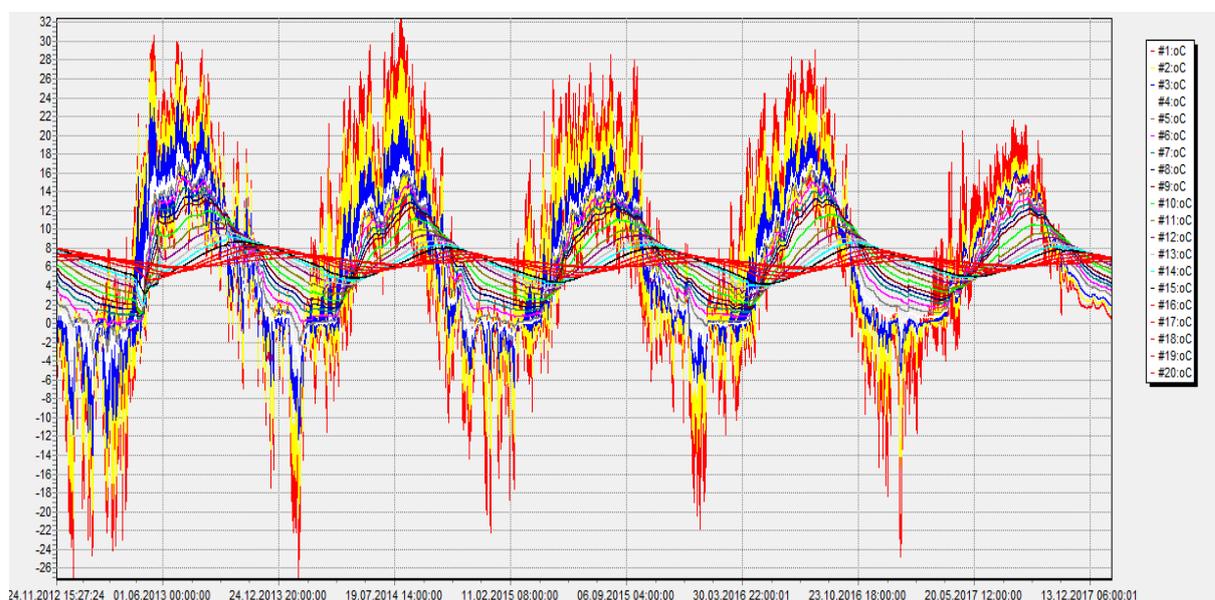


Рисунок 2. Отображение колебаний температур пород на разных датчиках в период 2013-2018 гг.

На основе этих данных построены профили среднемесячных температур (средневзвешенные значения) по глубине разреза для площадок расположенных на 1-ой и 2-ой террасах. Среднегодовая температура пород составляла величину $t = +6,5^{\circ}\text{C}$, что позволяет ее отнести к зоне устойчивого сезонного промерзания, глубина годовых амплитуд около 12 м (рис. 3).

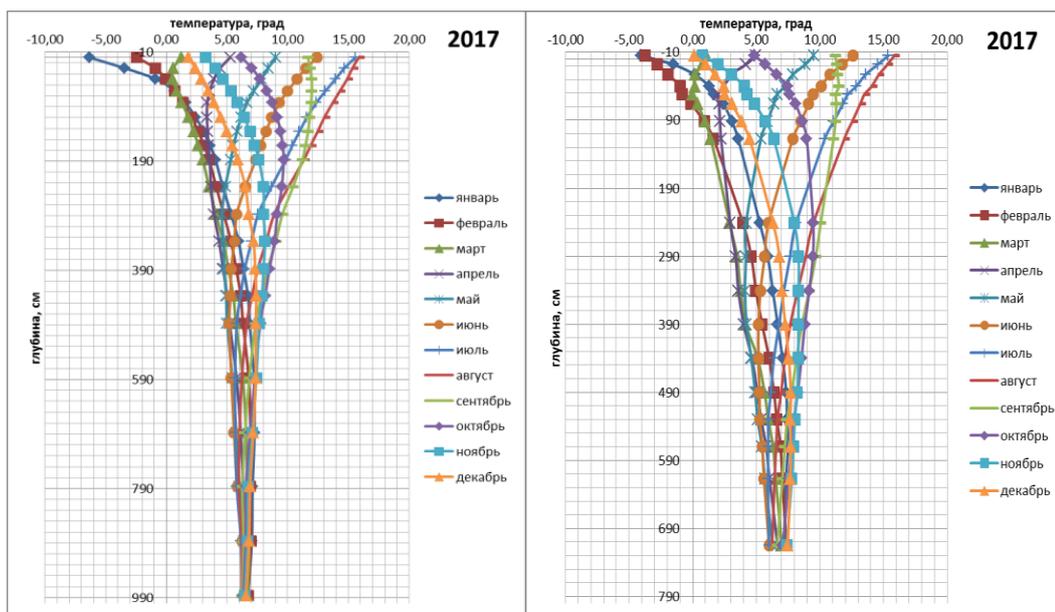


Рисунок 3. График распределения среднемесячных температур с глубиной для площадки, расположенной на 1-ой террасе (слева) и на 2-ой террасе (справа) [4].

Температурные профили использовались также для экспериментального нахождения величины $\xi(\tau)$ по значению температуры начала замерзания пород (рис. 4а, 4б), которая для незасоленных пород несильно отличается от нуля. Эти данные позволяют проследить динамику слоя сезонного промерзания.

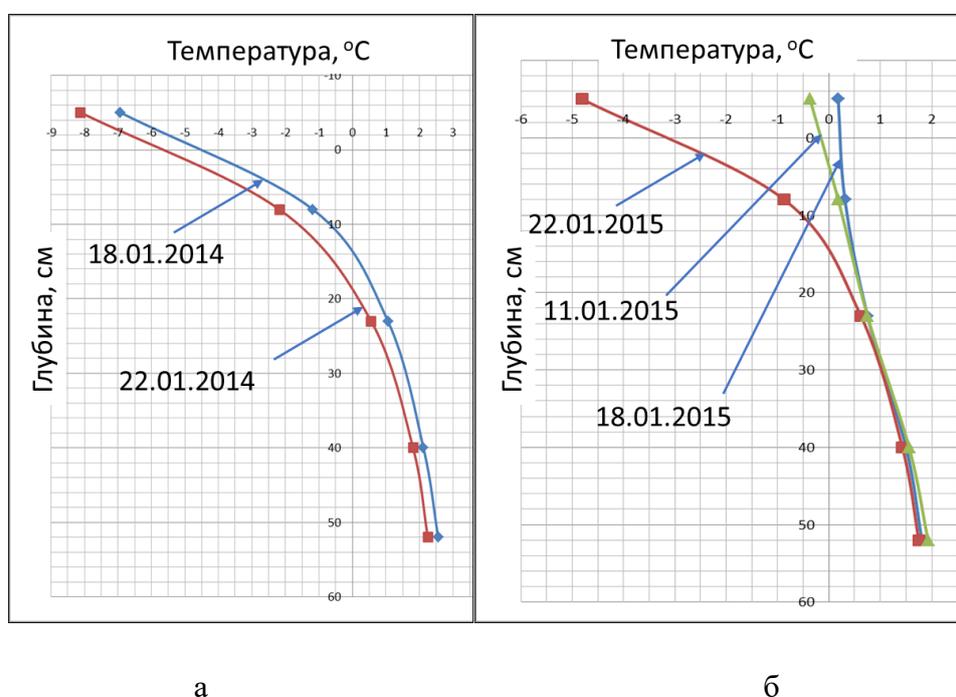


Рисунок 4. Графики распределения температуры в слое сезонного промерзания на 2-й надпойменной террасе в 2014 году – а и в 2015 году – б (перестроены на основе данных [4]).

Как видно на графиках, в период полевых измерений слой сезонного промерзания может изменяться незначительно, (рис а), так и полностью растаять, а затем промерзнуть ту же мощность (около 10 см) всего за несколько дней (рис. б).

Пучение характеризовалось его интенсивностью с глубиной, которая в разные годы наблюдений могла быть как положительной, так и отрицательной в промерзшем слое. Это зависело от климатических условий зимнего периода, например в 2013 и 2016 годах были достаточно стабильные отрицательные температуры и интенсивность пучения была положительной в мерзлом слое, тогда как в 2015 году были частые оттепели и многократные промерзания, вследствие чего интенсивность пучения была в основном отрицательная (рис. 5).

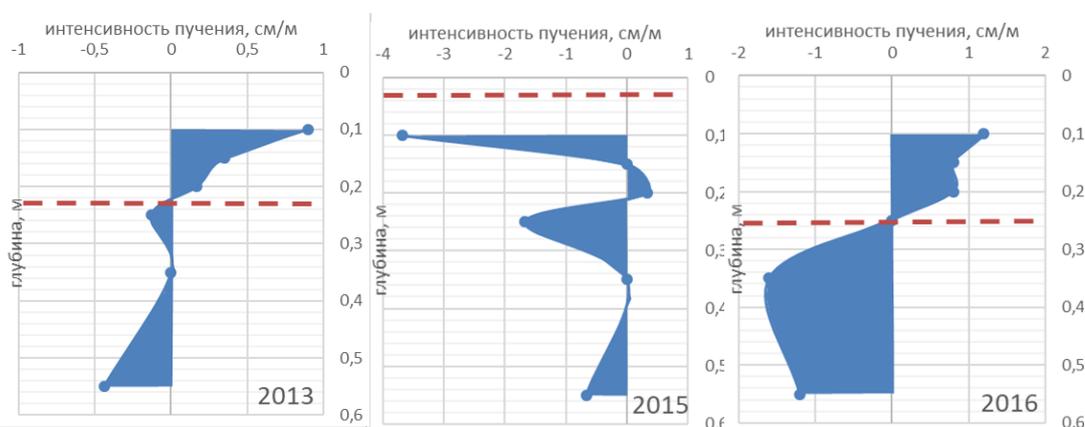


Рисунок 5. Эпюры интенсивности пучения с глубиной на пойме р. Москвы (пунктирная линия – мощность слоя сезонного промерзания) [5].

Результаты сопоставления расчетов и экспериментальных значений

Для рассмотрения расчетных методов был выбран 2013 год, потому что этот зимний период был с наиболее стабильными отрицательными температурами. На момент экспериментальных измерений длительность периода с отрицательными температурами составила 62 дня. Результаты сопоставления полученных результатов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчетов по двум методикам и полевых измерений

	Расчетная величина пучения по методике Орлова В. О., см	Расчетная величина пучения по методике ДорНИИ., см	Экспериментальное значение величины пучения, см
пойма	0,19	0,13	0,08

МАТЕРИАЛЫ 5-ОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ДЕНЬ НАУКИ 2020»

1-я терраса	1,2	0,98	1,66
2-я терраса	0,79	0,74	0,87

Оба метода показали хорошую сходимость результатов с полевыми для 2-й террасы (0,79;0,74 – расчет, 0,87 – эксп.) и удовлетворительную для 1-й (1,2; 0,98– расчет, 1,66– эксп.), но для поймы показания отличались значительно (0,19; 0,13– расчет, 0,08– эксп), что говорит о сложности определения величины пучения при близкорасположенных водоносных горизонтах. В целом, оба метода годятся для оценки величины пучения и его прогнозирования, при отсутствии возможности экспериментального определения.

Выводы

Среднегодовая температура пород на территории Звенигородской биостанции составляет +6,5 - +6,8°C, что позволяет ее отнести к зоне устойчивого сезонного промерзания. В 2015 году, вследствие продолжительного теплого периода во время зимы, породы полностью оттаяли, а к моменту проведения измерений в январе снова начали промерзать.

Несмотря на принципиальное различие в описании процесса миграции влаги к фронту промерзания, определенных различий в учете влияния климатических факторов и характеристик пород, методики расчетного определения величины пучения и Орлова В.О. и ДорНИИ показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными для площадок, расположенных на 1-ой и 2-ой террасах. Существенная погрешность для площадки, расположенной на пойме, объясняется способом учета влияния близко лежащего водоносного горизонта.

Литература

1. <http://www.geoprecision.com/produkte-d/temperaturmesskette>
2. Полевые методы гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических, инженерно-геофизических и экологи-геологических исследований // Под ред. В.А. Королева, Г. И. Гордеевой, Г. А. Богословского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ. 2000. 352с.
3. СП 25.13330.2012 Основания зданий и сооружений на вечномёрзлых грунтах.

4. Уварова А.В., Комаров И. А., Исаев В. С. Закономерности динамики температурного режима и сезонного промерзания на Звенигородской биостанции за пятилетний период наблюдений / Актуальные проблемы геоэкологии. Т1 КДУ, 2018. с. 201-206.

5. Уварова А.В., Болотюк М.М., Комаров И.А. Закономерности изменений температурного поля и процесса пучения для сезонно-мерзлых пород на примере Подмосковья // Процессы в геосредах. № 3 (21). 2019. С. 411-420.

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛАВИНЫ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ С СУБТРОПИЧЕСКИМ КЛИМАТОМ

Турчинская О.И.¹

¹Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; *olgaturch@yandex.ru*

Проанализированы данные о процессе лавинообразования в горных районах с субтропическим климатом. Выявлено, что на фоне общего потепления климата происходит нарастание межсезонной изменчивости температуры воздуха и снежности, что приводит к появлению сезонов высокой лавинной активности. Так, зима 2016/17 г. оказалась аномально-снежной с высокой степенью лавинной активности для территории Сьерра-Невады, где зимние осадки вдвое превысили норму. На территории Западного Кавказа только начало зимы было многоснежным, а зимне-весенний период был в пределах нормы, со средней степенью лавинной активности.

SNOW COVER AND AVALANCHES IN MOUNTAIN AREAS WITH SUBTROPICAL CLIMATE

Turchinskaya O.I.¹

¹Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; *olgaturch@yandex.ru*

The process of avalanche formation in mountainous areas with a subtropical climate was analyzed. It was found out that against the background of general warming of the climate, there is an increase in inter-season variability of air temperature and snow, which leads to seasons of

high avalanche activity. For example, the winter of 2016/17 turned out to be abnormally snowy with a high level of avalanche activity for the territory of the Sierra Nevada, where winter precipitation was twice the norm. In the Western Caucasus, only the beginning of winter was snowy, and the winter-spring period was within the normal range, with an average degree of avalanche activity.

Снежные лавины широко распространенное природное явление в различных горных районах Земли. О расширении границ распространения этого стихийного бедствия свидетельствуют две причины. Первая – получение новой информации о лавинах по мере проведения научных исследований в горах с применением современных снегомерных съемок, метеорологических наблюдений и дистанционных методов. Вторая – увеличение количества лавин в результате хозяйственного и рекреационного освоения, сведения лесов, строительства автомобильных и железных дорог, роста числа туристов и горнолыжников, которые находятся в зонах воздействия лавин. Внезапное возникновение лавин нередко вызывает катастрофические последствия, приводящие к гибели людей и большим материальным ущербам. Лавинные катастрофы возможны не только в средне- и высокогорных районах, но даже в низкогорье (Рис.1).

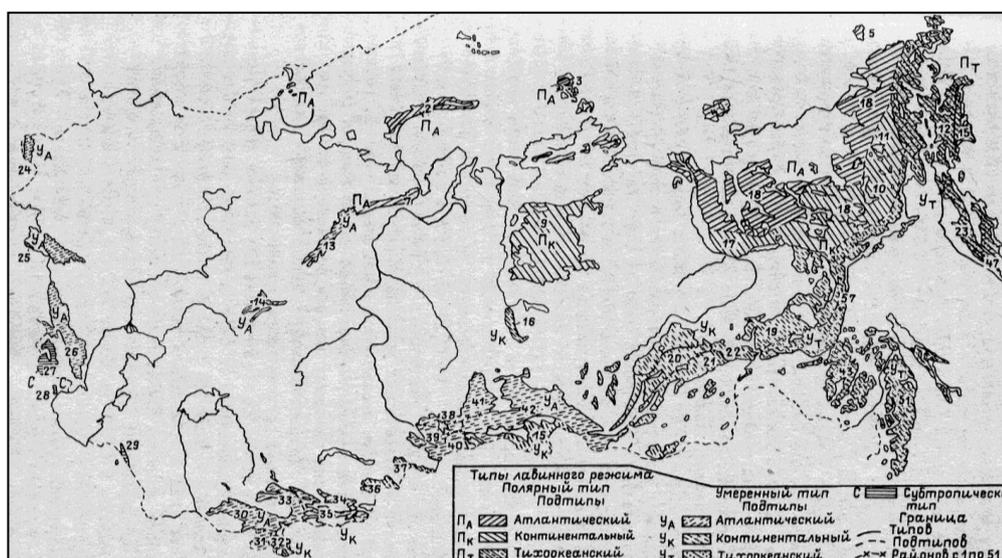


Рис.1. Районирование горных территорий по типам лавинного режима [1]

В условиях морского теплого климата продолжительные и интенсивные снегопады приводят к формированию мощного снежного покрова в течение нескольких часов и возникновению особо крупных разрушительных лавин. Большое количество осадков, нередко выпадающих в смешанном виде, и годовой ход температур в условиях мягкой

зимы предопределяет значительное количество оттепелей, частые смены температурных условий приводят к образованию сложно стратифицированной снежной толщи, а значит и к разнообразию типов лавин, которые трудно прогнозировать.

Изучение снеголавинного режима территорий со специфичными ороклиматическими условиями, сложными циркуляционными процессами в условиях влажно-субтропического климата в этой связи приобретает особое значение. Снежность – важный параметр лавинного режима, характеризующий, в том числе, его многолетнюю изменчивость. Современные изменения климата предопределяют необходимость изучения снежности зим при выявлении особенностей снеголавинного режима.

Южный макросклон Западного Кавказа в районе долин рек Мзымта, Сочи и Туапсе и горы Сьерра-Невада в США, согласно климатической классификации, относятся к средиземноморскому подтипу субтропического климата [1;4]. В прибрежной зоне этот тип климата характеризуется мягкой дождливой зимой и достаточно жарким и сухим летом. Граница областей с субтропическим климатом проходит от прибрежной зоны вплоть до высокогорья, где климат характеризуется более суровыми зимними условиями, благоприятными для формирования снежных лавин. Основанием для включения этих областей в субтропический климат являются частые вторжения теплых воздушных масс с юга (Западный Кавказ) и запада (Сьерра-Невада), которые существенно смягчают термический режим, приносят с собой большое количество влаги и в годовом ходе формируют зимний максимум осадков, свойственный субтропической области.

Изучения снежных лавин в таких областях началось значительно позже, чем в более холодных высокогорных районах. Ставилось под сомнение значительность лавинной опасности в условиях субтропического климата, так как предполагалось, что, несмотря на обильные твердые осадки, снежный покров быстро уплотняется или исчезает при положительных или нулевых температурах зимнего периода. Однако дальнейшие исследования показали, что в поясе неустойчивого залегания снежного покрова к лавиноопасным ситуациям приводят интенсивные снегопады и зимнее снеготаяние (январь-февраль), а на высотах более 1000 м, которые отличаются максимальными снегозапасами и наибольшей интенсивностью снегопадов преобладают лавины из свежеснеговывающего снега и снеготаяния в феврале-марте, а выше зоны леса – метели. Таким образом, субтропический тип лавинного режима характеризуется развитием процессов лавинообразования в условиях положительных температур холодного периода и интенсивных продолжительных

снегопадов, что дает возможность для формирования всех генетических типов снежных лавин на протяжении зимнего периода.

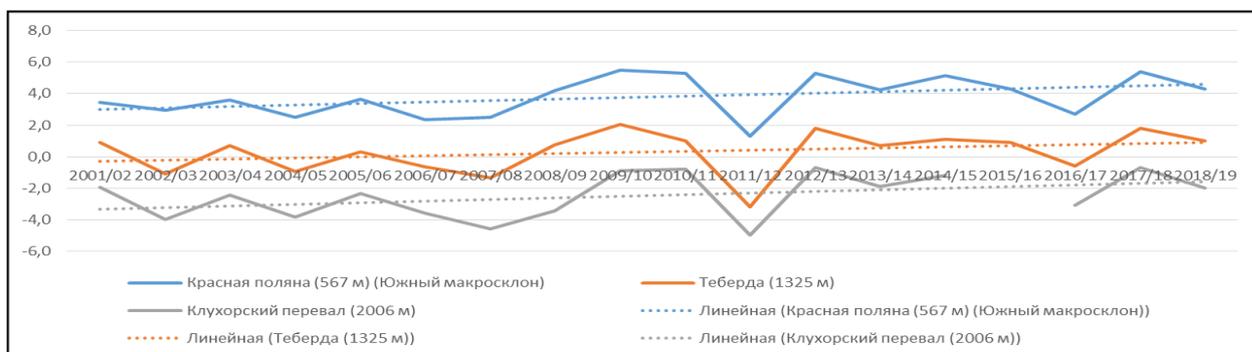


Рис.2. Ход среднезимних температур и температурный тренд для м/с «Красная поляна» (567 м), «Теберда» (1325 м) и «Клухорский перевал» (2006 м) за сезоны 2001/02-2018/19

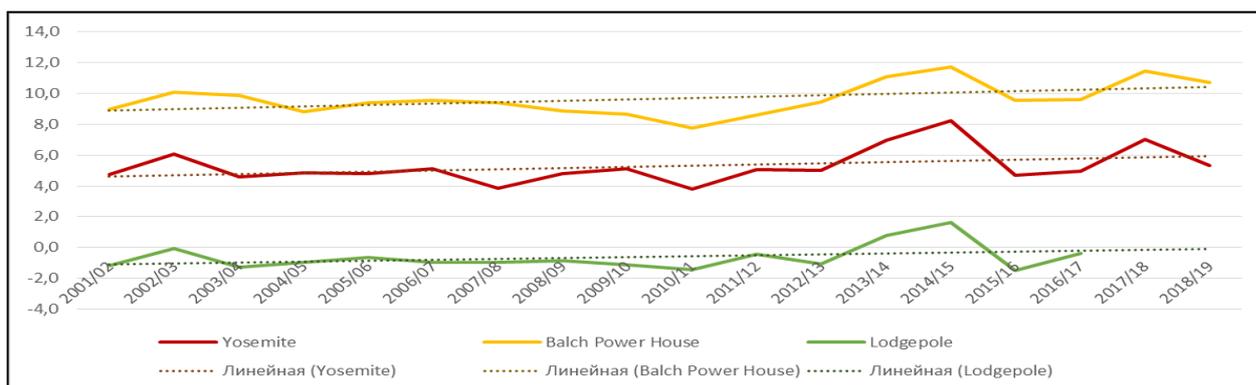


Рис.3. Ход сумм осадков и тренд для м/с «Красная поляна» (567 м), «Теберда» (1325 м) и «Клухорский перевал» (2006 м) за период 2000/01-2016/17

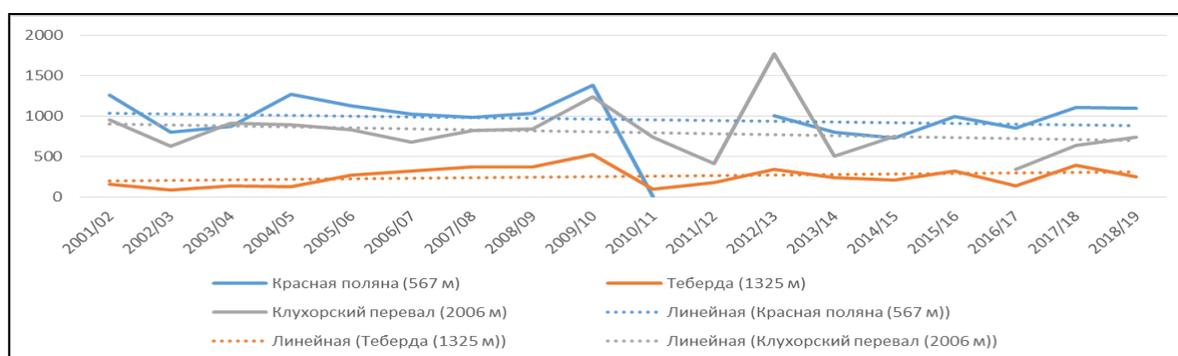


Рис.4. Ход зимних температур и температурный тренд м/с «Balch Power House» (533 м), «Yosemite Park HQ» (1216 м) и «Lodgepole» (2057 м) в сезоны 2001/02-2018/19

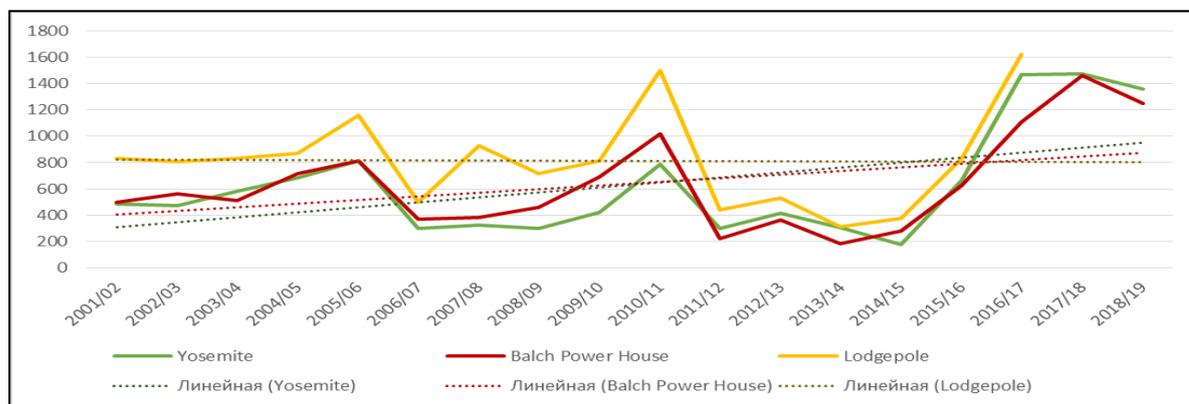


Рис.5. Ход сумм зимних осадков и тренд осадков на м/с «Balch Power House» (533 м), м/с «Yosemite Park HQ» (1216 м) и «Lodgepole» (2057 м) в сезоны 1958/59-2018/19

На основе полученных данных в выделены особенности формирования лавин в условиях субтропического климата, установлены ведущие факторы лавинообразования в горах Западного Кавказа и Сьерра-Невады и проанализированы показатели снеголавинного режима Западного Кавказа и Сьерра-Невады, их динамика:

Развитие процессов лавинообразования в условиях субтропического типа климата происходит при нулевых значениях или положительных температурах холодного периода и интенсивных продолжительных снегопадов.

На исследуемых территориях преобладают лавины из свежеснегоснега, которые сходят во время снегопадов, лавины снеготаяния в феврале-марте, а выше зоны леса – метелевые лавины. Во многих случаях интенсивные снегопады принимают характер ливневых осадков, которые приводят к формированию мокрых лавин большой разрушительной силы.

С конца XX века и в первых десятилетиях XXI века по всем метеостанциям исследуемых регионов наблюдается тенденция повышения среднегодовых и средnezимних температур. При этом на протяжении последнего десятилетия наблюдается положительный тренд зимних осадков для метеостанций, находящихся на западном склоне Сьерра-Невады.

На основе данных многолетних полевых наблюдений выделены высотные пояса, характеризующие снегонакопление в долине р. Мзымта (Западный Кавказ) и бассейне р. Сан-Хоакин (Сьерра-Невада). Наиболее снежный пояс на Южном макросклоне Западного Кавказа расположен на высотах 1800-2000 м, а на территории Сьерра-Невады к высотам 2400-3200 м.

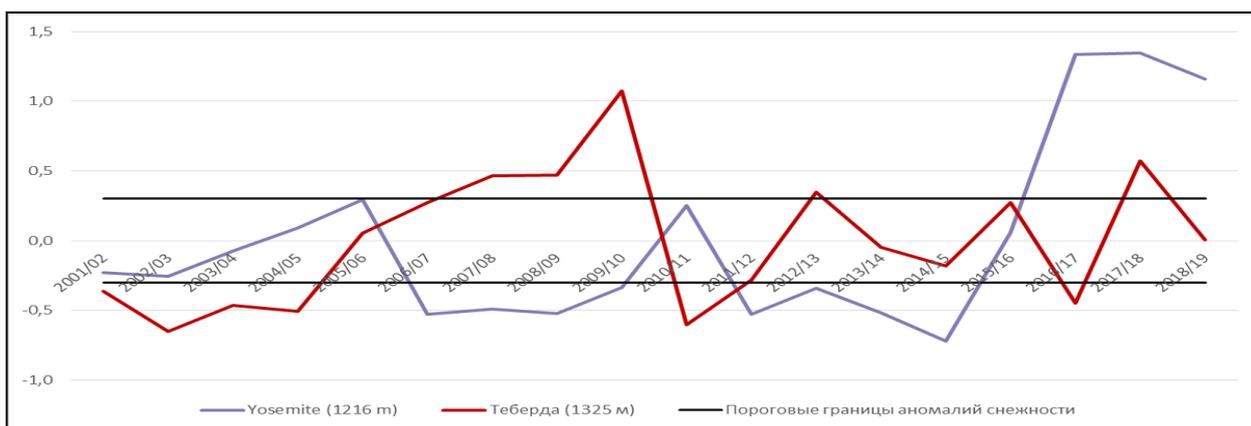


Рис.6. Аномалии осадков за холодный период (с ноября по март) на м/с Yosemite Park (1216 м) и Теберда (1325 м) 2001/02-2018/19 гг.

Заключение

Проведена оценка снежности и степени лавинной активности зим по методике, разработанной А.Д. Олейниковым. Типизация зим по степени лавинной активности, построенная на принципе корреляционной решетки, позволяет выявить зимы разной степени лавинной активности при определенном сочетании температурных условий и количества выпадающих осадков. Анализ матрицы позволил установить, что на территории Сьерра-Невады сезон 2016/17 г. характеризовался аномально высокой степенью лавинной активности. Это объясняется тем, что на протяжении всего зимнего сезона были относительно низкие отрицательные температуры воздуха (средние зимние температуры от 5° до $-0,5^{\circ}$) и частые обильные снегопады (на м/с Mammoth в январе выпало 622 см (норма 165 см); на м/с Yosemite в тот же месяц выпало 138 см (норма – 22,9 см)). Аномально высокая лавинная активность на территории Сьерра-Невады также наблюдалась в сезон 2010/11, когда температуры на м/с-х опускались до -5° и за всю зиму на м/с Yosemite выпало 106,4 см снега при норме в 75 см. На м/с Mammoth зимой 2010/11 выпало 673,6 см снега при норме в 389 см.

Зима 2016/17 г. на Западном Кавказе попала в разряд районов со средней лавинной активностью. Полученные выводы подтверждаются фактическими данными. Аномально высокая степень лавинной активности на Западном Кавказе наблюдалась зимой 2007/08 г.. На территории Западного Кавказа наблюдались средние зимние температуры от $2,5^{\circ}$ до $-4,6^{\circ}$. При этом снежный покров не добрал среднегодовой нормы.

Следует отметить, что это происходит на фоне быстро протекающих изменений климата и явного тренда потепления при возрастающей рекреационной нагрузке. Единичные возвраты зимних холодов свидетельствуют о том, что на фоне зим

слабой и средней лавинной активности возможно появление суровой и снежной зимы с повсеместными и неоднократными лавинными последствиями, как и произошло в этом году на территории Сьерра-Невады.

Литература

- 1)Алисов Б.П. Климатология, М., Изд-во «Высшая школа», 1962. 227 с.
- 2)Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / главный ред. В.М. Котляков. Том 1. РАН. М., РАН, 1997. 262 с.
- 3)Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / главный ред. В.М. Котляков. Том 2 книга 1. РАН М., РАН, 1997. 262.
- 4)Хромов С.П. Метеорология и климатология для географических факультетов. 3-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 456 с.
- 5)<https://rp5.ru>
- 6) www.sierraavalanchecenter.org

ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ МЕРЗЛЫХ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Агапкин И.А.^{1,2}, Кальбергенов Р.Г.¹

¹Институт геоэкологии РАН, Москва, Россия;

²Институт геохимии РАН, Москва, Россия; *agapkinia@gmail.com*

Приводятся результаты оценки газопроницаемости в зависимости от водо-(льдо)насыщения в мерзлых песках. Для исследований приготавливались образцы с различной влажностью и степенью влажности-льдистости. Опыты проводились в условиях изменяемого давления газа и определялся объем газа прошедшего через образец.

GAS PERMEABILITY OF FROZEN SANDY SOILS

Agapkin I.A.^{1,2}, Kal'bergenov R.G.¹

¹Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow, Russia;

²Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia;
agapkinia@gmail.com

The results of gas permeability assessment depending on water (ice) saturation in frozen sands are presented. For research, samples were prepared with different water content and the degree of moisture-ice content. The experiments were carried out under conditions of variable gas pressure and the volume of gas passing through the sample was determined.

Введение

Под газопроницаемостью грунтов понимается пропускная способность грунтов сквозь себя газа при наличии перепада давления. В связи с потеплением климата и, как следствие структурных изменений в мерзлых грунтах, изучение газопроницаемости принимает большую актуальность. Существовало мнение, что многолетнемерзлые породы являются естественным флюидоупором, где невозможна миграция газов. Но из-за изменения климата в мерзлых толщах меняется льдистость, в результате чего формируются проницаемые зоны.

Для исследования газопроницаемости грунтов в ИГЭ РАН была разработана установка и методика, позволяющие определять расход газа прошедшего через образец грунта определенного объема за единицу времени.

Методика исследований

Методика позволяет определять газопроницаемость грунтов в широком диапазоне температур от +20°C до -8°C. В качестве флюида использовался воздух, динамическая вязкость которого близка к динамической вязкости горючих газов, работа с которыми не безопасна. Например, динамическая вязкость метана $\eta=1028 \cdot 10^{-8}$ Па·с, а воздуха $\eta=1708 \cdot 10^{-8}$ Па·с при температуре 0°C.

Установка по исследованию газопроницаемости мерзлых грунтов представлена на рисунке 1.

Установка работает следующим образом. В мерзлотной камере (1) размещен одометр (2) с исследуемым грунтом охлажденный до нужной температуры. Через регулятор давления (5) магистралями (4) подается газ (воздух) в теплообменник (3), который после охлаждения поступает в образец грунта в одометре (2). После открытия запорного крана (9) на определенное время, газ, прошедший через образец, поступает в колбу с водой (6), вытесняя воду в мерную сливную емкость (7), установленную на технических весах (8). В нужное время прохождение газов через образец прекращается запорным краном (9), и по весу отжатой воды в емкость (7) определяют объем газа.

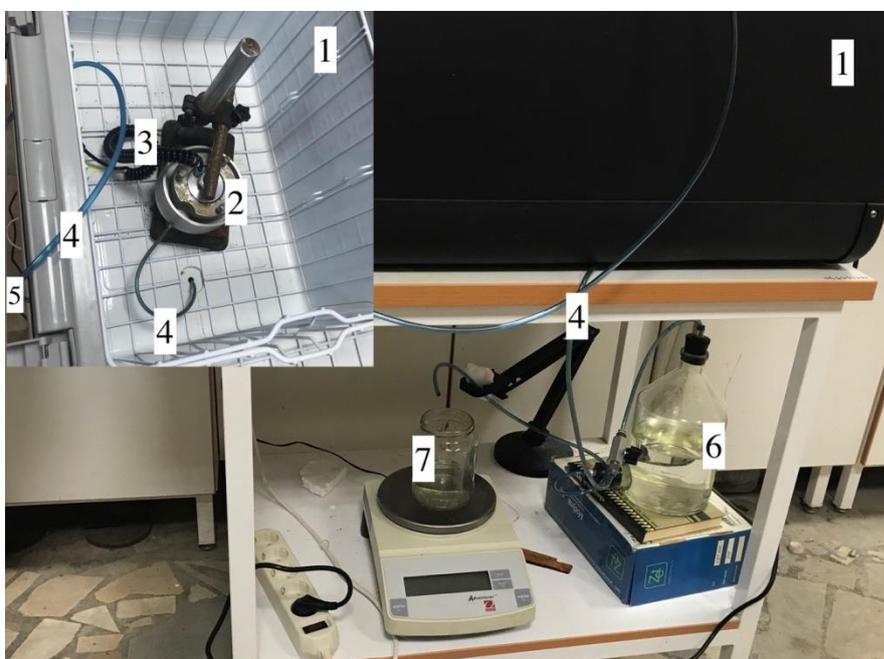


Рисунок 1. Установка по изучению газопроницаемости мерзлых грунтов.

Обобщенным показателем газопроницаемости служит показатель эффективной проницаемости K , определяемый по формуле:

$$K = \frac{2VL\eta}{tSP^2},$$

Где:

V – объем газа прошедшего через грунт, см^3

L – длина образца, см

η – вязкость газа, с·Пз (пуаз)

МАТЕРИАЛЫ 5-ОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ДЕНЬ НАУКИ 2020»

t – время фильтрации газа, с

P – давление газа на входе в образец, кПа.

Эффективная проницаемость газов как и проницаемость жидкостей измеряется в Дарси (Д) или в миллидарси (мД). Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Результаты

По предложенной методике определено 14 значений эффективной газопроницаемости для мелких песков и 7 для пылеватых песков. В зависимости от льдистости газопроницаемости принимает различные значения.

Таблица 1. Газопроницаемость образцов в мерзлом состоянии.

Номер	Влажность W, %	Льдистость L, %	Газопроницаемость К, мД
Песок мелкий			
1	10	41	8.5
2	19.2	71	0.22
3	21.5	99	<0.01
4	16.9	79	0.99
5	11.5	45.6	6.6
6	12.7	51	5.2
7	10.1	41	7.9
8	15.9	64	4.5
9	20	81.6	3.7
10	11.5	45.6	5.6
11	13	51	5.8
12	14.6	64	4.6

МАТЕРИАЛЫ 5-ОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ДЕНЬ НАУКИ 2020»

13	16.2	82	3.6
14	25	99	<0.01
Песок пылеватый			
15	16.3	69	0.8
16	16.3	69	0.8
17	10	46	6.9
18	16.3	70	3.96
19	21.7	99	<0.01
20	16.3	69	0.5
21	16.3	69	0.01

Заключение

Проведенные исследования показали, что песчаные грунты в определенных условиях залегания проявляют свойства газопроницаемости. Как видно из таблицы 1, основным параметром, от которого зависит газопроницаемость мерзлых грунтов, является степень водо-(льдо)насыщения.

Изучение газопроницаемости мерзлых грунтов является важным при моделировании газовыделения для оценки возможности концентрации и миграции газов во вмещающих и перекрывающих породах при изменении геокриологических условий. Такие исследования должны быть важной составляющей инженерно-геологических исследований мерзлых газосодержащих грунтов.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ
АБРАЗИОННО-ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ
СЕВАСТОПОЛЯ**

Исаев В.С.¹, Игнатов Е.И.¹, Новиков А.А.², Каширина Е.С.², Трачук В.²

Аманжуров Р.М.^{1,3}, Горшков Е.И.³, Вербовский В.В.⁴

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

Адрес: 109991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Е-mail: ign38@mail.ru, tpomed@rambler.ru

²Филиал МГУ в г. Севастополе, г. Севастополь, Россия,

Адрес: 299000, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7

Е-mail: e_katerina.05@mail.ru, a_novik@bk.ru

³ООО «Современные ГеоТехнологии», Москва, Россия

Адрес: 115035, г. Москва, ул. Б. Ордынка, стр.1

info@geotechnologies.pro

⁴ООО «АртГео», г. Москва, Россия

Адрес: 108814, г. Москва, п. Сосенское, ж/к Дубрава

info@art-geo.ru

В статье приведены результаты работ по изучению участков распространения опасных экзогенных процессов на побережье г. Севастополя. С использованием лазерного сканирования (лидарной съемки) выполнена съемка ключевых участков побережья в районе Немецкой балки и пляжа Учкучевка, где отмечается активное проявление обвальнo-оползневых и абразионных процессов. Наземное лазерное сканирование выполнено с использованием трехмерной лазерной сканирующей системы с экстремально высокой скоростью измерений до 400 000 изм./сек и 240 скан линий/сек. Лазерное сканирование проведено в июле 2016 г., июле 2017 г., июле и октябре 2018 г. В результате анализа полученных данных было определено, что средняя скорость разрушения клифа в районе пляжа Учкучевка составила 0,8 м/год. Максимальная скорость разрушения клифа достигла 4,6 м и наблюдалась на локальном десятиметровом участке сползания блока отседания. В районе Немецкой балки в результате террасирования образовался антропогенный «вырез» длиной около 150 м, шириной около 300 м и глубиной от 2,5 до 10 м.

Ключевые слова: лазерное сканирование, ГИС-технологии, побережье, обвальнo-оползневые процессы, Крым.

USAGE OF LASER SCANNING FOR THE EVALUATION OF THE DYNAMICS OF THE
ABRASION-LANDSLIDE PROCESSES IN THE COASTAL ZONE OF SEVASTOPOL

Isaev V.S.¹, Ignatov E.I.¹, Novikov A.A.², Kashirina E.S.²,
Amanzhurov R.M.^{1,3}, Gorshkov E.I.^{1,3}, Verbovsky V.B.⁴

¹ MSU named after M.V. Lomonosov Moscow, Russia,

Address: 109991, Moscow, Lenin Hills, 1

E-mail: ign38@mail.ru, tpomed@rambler.ru

² Branch of Moscow State University in Sevastopol, Sevastopol, Russia,

Address: 299000, Sevastopol, st. Heroes of Sevastopol, 7

E-mail: e_katerina.05@mail.ru, a_novik@bk.ru

³OOO "Modern GeoTechnologies", Moscow, Russia

Address: 115035, Moscow, st. B. Ordynka, p. 1

info@geotechnologies.pro

⁴OOO "ArtGeo", Moscow, Russia

Address: 108814, Moscow, Sosenskoye settlement, railway station Dubrava

info@art-geo.ru

The article presents the results of studies on the distribution of hazardous exogenous processes on the coast of Sevastopol. Usage of laser scanning (lidar survey), key coastal areas were surveyed in the area of Deutsche Beam and Uchkuevka Beach, where there is an active manifestation of landslide and landslide and abrasion processes. Ground laser scanning was performed using a three-dimensional laser scanning system with an extremely high measurement speed of up to 400,000 meas. / Sec and 240 scan lines / sec. Laser scanning was carried out in July 2016, July 2017, July and October 2018. As a result of the analysis of the obtained data, it was determined that the average rate of destruction of the cliff near the Uchkuevka beach was 0.8 m / year. The maximum destruction rate of the cliff reached 4.6 m and was observed in the local ten-meter section of the sliding block of the squatting unit. As a result of terracing, an anthropogenic "cut" about 150 m long, about 300 m wide and 2.5 to 10 m deep was formed in the area of the Deutsche Beam.

Key words: laser scanning, GIS technology, coast, landslide landslide processes, Crimea.

Введение

Территория г. Севастополя характеризуется активным протеканием многих опасных экзогенных геологических процессов. Среди них отмечаются: обвально-оползневые, карстово-суффозионные, осыпные, абразионные процессы. Осложняет ситуацию и то, что г. Севастополь расположен в зоне восьмибалльной сейсмичности.

В г. Севастополе общая протяженность береговой линии моря (вместе с гидротехническими сооружениями) составляет 172 км, при этом более половины её относится к абразионному типу. В связи с расширением городской застройки в прибрежной зоне особую актуальность представляют исследования экзогенных процессов в узкой прибрежной полосе. На побережье сконцентрированы районы проявления активных обвально-оползневых и абразионных процессов, что приводит к отступанию берегов. Высокие скорости отступления береговой линии активизируют оползневые процессы в береговых уступах, сложенных рыхлыми малосвязанными алевролитами и алевролитистыми глинами с песчано-галечниковыми линзами. Подстиляется таврская свита плотными сарматскими известняками.

Вопросами оценки скорости отступления берегов и факторов, их определяющими, посвящены работы Ф.Э. Арэ, П.И. Башмакова, Б.А. Вильнера, О.Н. Виноградова, Я.Я. Гаккеля, Н.Ф. Григорьева, В.П. Зенковича, В.И. Кайялайнена, В.С. Кулакова, С.Л. Троицкого. По оценкам разных авторов [Ф.Э. Арэ, В.П. Зенковича] средняя скорость отступления береговой линии на западном побережье Севастополя составляет около 1-1,4 м/год. Для отдельных участков – скорость отступления берега достигает до 5 м/год (пляж Орловка, участки на пляже Учкучевка). При этом, указанная скорость является усредненной и основанной на оценках размеров сокращения берега на протяжении 50-70 лет (Игнатов и др., 2016). Дополнительным фактором, влияющим на резкое увеличение как количества оползней, так и на их масштабы, является хозяйственная деятельность в приоползневой зоне. Недостаток точных данных не позволяет с высокой точностью определить факторы активизации опасных экзогенных процессов в прибрежной зоне.

Цель статьи - определение пространственных параметров и временной динамики проявления опасных процессов в прибрежной зоне Севастополя по данным лазерного сканирования.

Материал и методы

В качестве ключевых выбраны участки в районе Немецкой балки и в южной части городского пляжа Учкучевка, характеризующиеся развитием обвально-оползневых и абразионных процессов и максимальной скоростью отступления берегов (рис.1). Берег

сложен таврской свитой, состоящей из чередования желтовато-бурых светлых алевроитов и алевроитистых глин и характерных более тонких слоев, окрашенными в красновато-бурый или ярко красный цвет (Муратов М.В., 1954)



Рис. 1 Характер побережья на ключевых участках: а) район Немецкой балки б) пляж Учкуевка

Ключевой участок в районе пляжа Учкуевка характеризуется интенсивными гравитационными (оползни и обвалы) и абразионными процессами (рис. 2).



Рис.2. Сохранившийся блок отседания на обвально-оползневом участке в районе пляжа Учкуевка

Одновременно участок в районе Немецкой балки является модельным для определения величины антропогенного изъятия грунта. В зимний период 2017-2018 гг. северный борт Немецкой балки был срезан на половину высоты и террасирован (рис. 3).

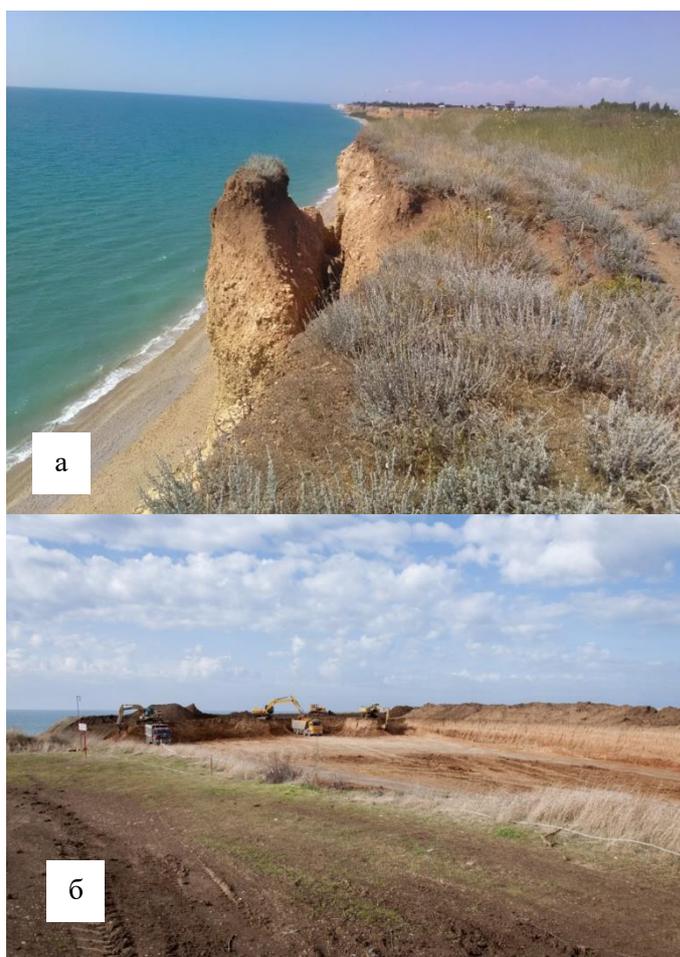


Рис. 3 Берег в районе Немецкой балки а) блок отседания 2016 г. б) антропогенная форма рельефа 2018 г.

Наземное лазерное сканирование выполнено с использованием трехмерной лазерной сканирующей системы с экстремально высокой скоростью измерений до 400 000 изм./сек и 240 скан линий/сек. Лазерное сканирование проведено в июле 2016 г., июле 2017 г., июле и октябре 2018 г. В результате измерений получены точки лазерных отражений, для которых вычислены пространственные координаты (x, y, z), форма и интенсивность отраженного сигнала. Полученные данные использованы для построения пространственных цифровых моделей измеряемых объектов. Для обработки данных и построения цифровой модели рельефа использован программный пакет RiSCAN PRO.

Лазерное сканирование в районе пляжа Учкueвка выполнено с 38 точек наблюдения (рис. 4).



Рис. 4. Точки расположения лазерной съемки на ЦМР южной части городского пляжа Учкучевка
Длина участка лазерной съемки на ключевом участке Учкучевка составила около 250 м.

Лазерное сканирование в Немецкой балке выполнено с 40 точек наблюдения. Отсканированы береговая линия длиной около 350 метров с клифом, тальвег балки, южный задернованный и северный террасированный борта балки.

Результаты и обсуждение

На основе полученных данных построена цифровая модель обвально-оползневых склонов в районе пляжа Учкучевка (рис.5).



Рис. 5. Цифровая модель обвально-оползневых склонов в районе пляжа Учкучевка

Для оценки динамики изменения рельефа побережья урочища Учкучевка на построенной ЦМР рассмотрено 5 профилей (рис. 6). Расположение профилей соответствует участкам разной интенсивности разрушения клифа.

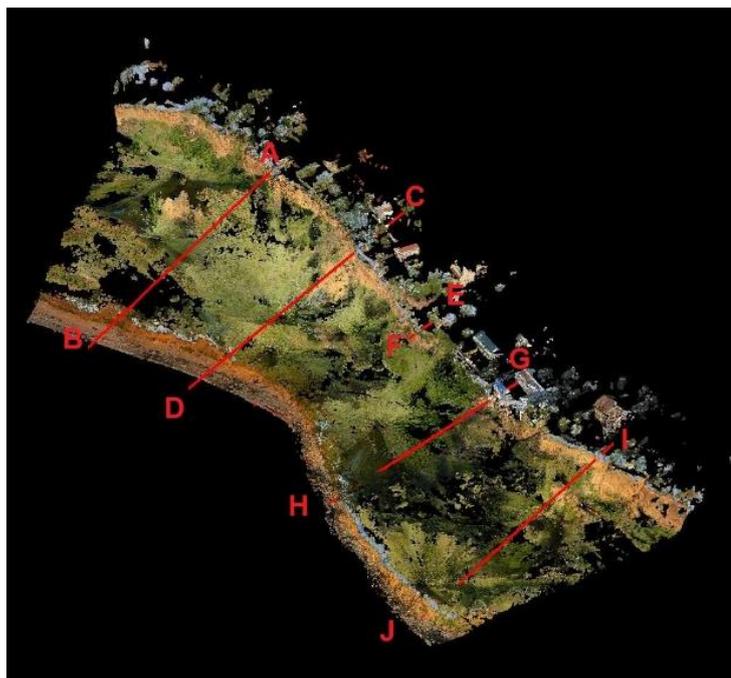


Рис. 6. Расположение профилей на ЦМР, построенной по данным лазерного сканирования Голубой линией показан профиль берега 2016 г., желтой – 2017 г. (рис. 7).

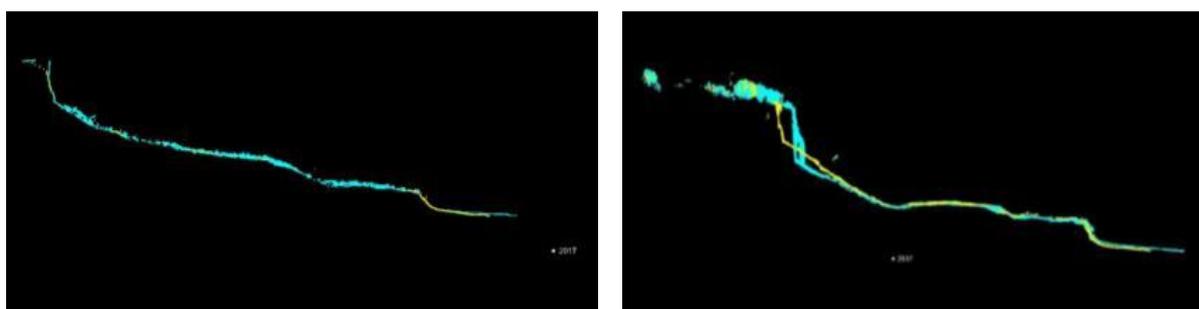


Рис. 7. Разрез по профилю А-В (слева) и профилю С-Д (справа), 2016-2017 гг.

Как видно из графических материалов за год наблюдений бровка клифа сократилась в среднем на 0,8 м. На профиле D–С зафиксирован участок максимальной активности обвально-оползневых процессов на участке Учкуевка в 2017 г. Размер блока отседания, отколовшегося от бровки уступа в 2017 г., составил 4,6-4,8 м (рис. 8).



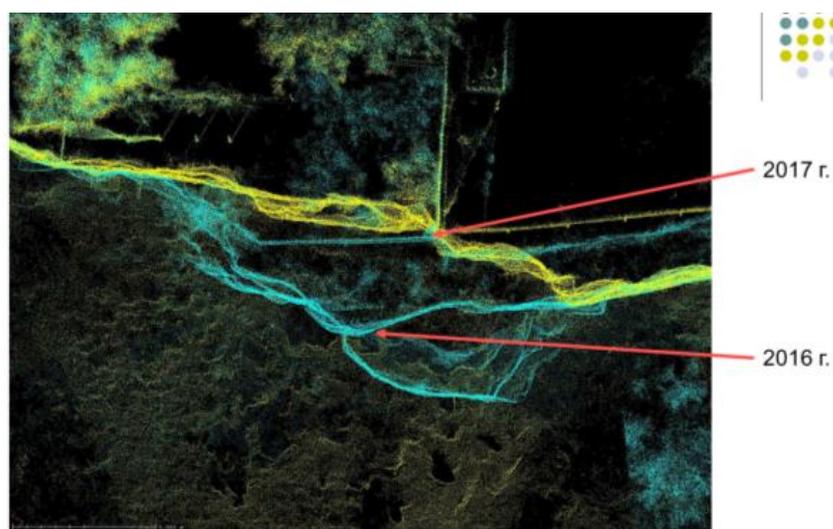


Рис. 8. Размеры блока отседания, вид сбоку (верхний), вид сверху (нижний), 2016-2017 гг.

Горизонтальные параметры разрушения верхней части клифа за 2016-2017 гг. достигли 4 м, что отражает профиль С-D (рис. 9).

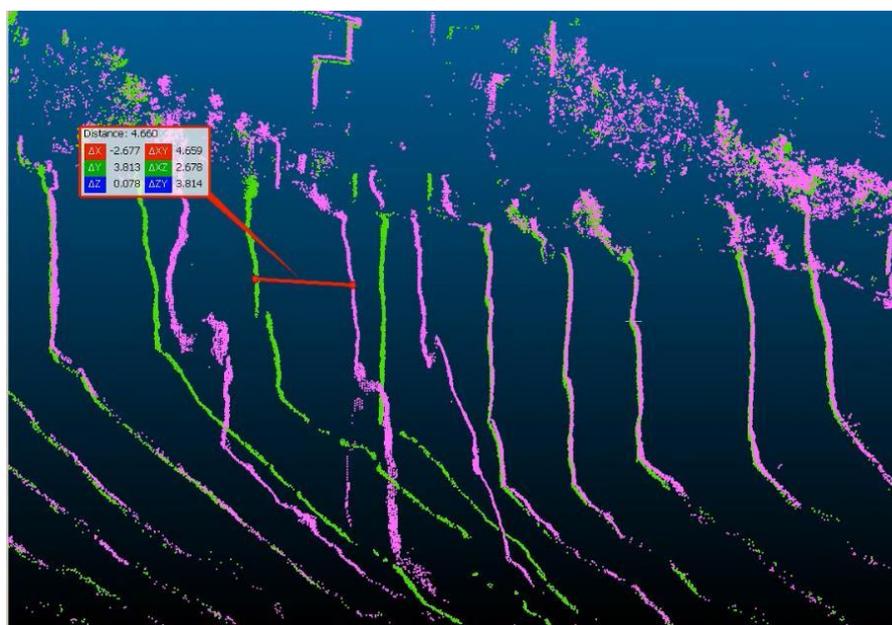


Рис. 9. Разрез по профилю С-D (фрагмент), 2016-2017 гг.

Лазерное сканирование позволило определить морфометрические параметры не только блоков отседания, но и проседания склона (рис. 10).

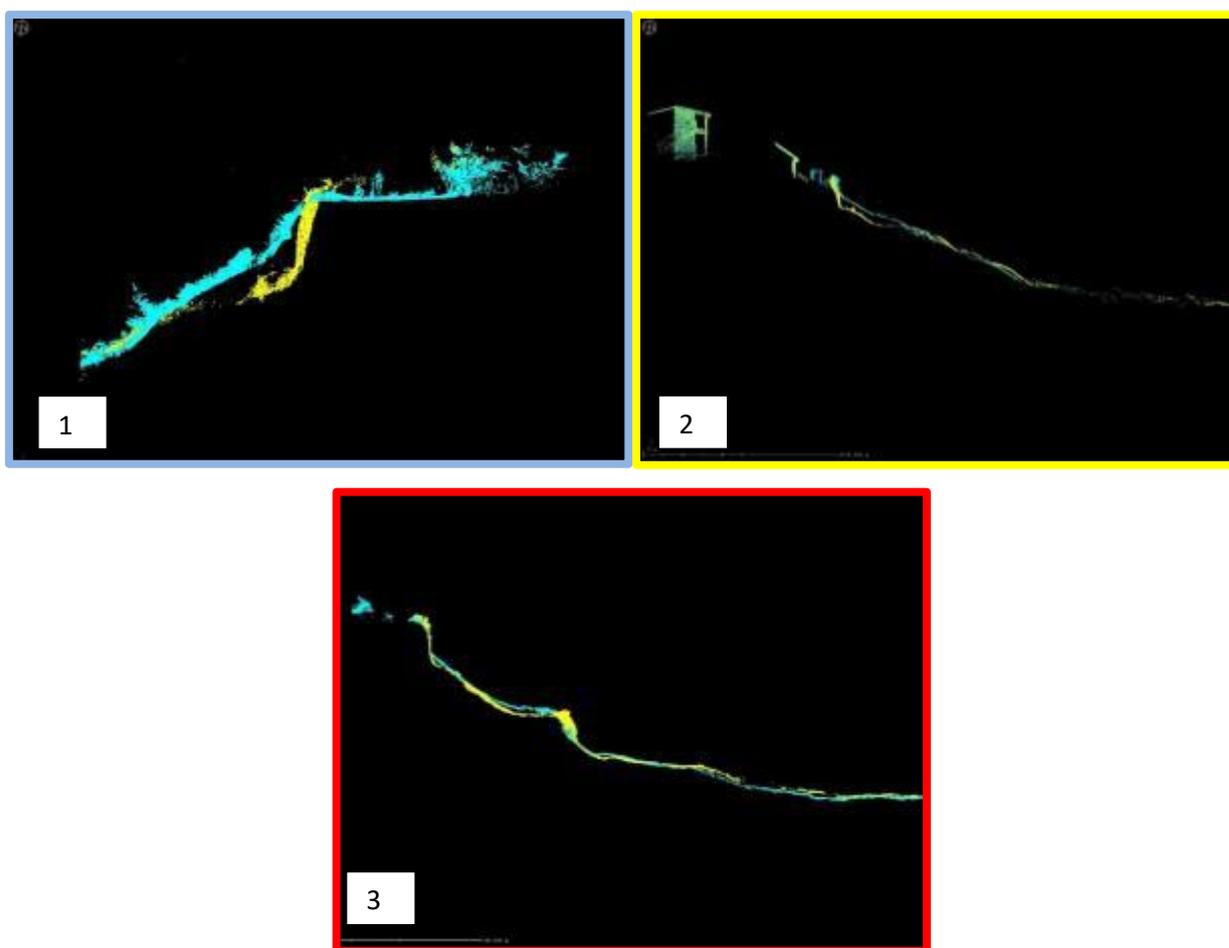


Рис. 10. Разрез по профилю Н-Г, 2016-2017 гг.

Как видно из рисунка 10, по элементам 1,2,3 профиля Н-Г наблюдается проседание склона, т.е. сокращение объемов склонового материала. Максимальный размер проседания составил более 2 м за период с июля 2016 г. по июль 2017 г.

С другой стороны, происходит размыв береговой линии штормовой деятельностью моря - абразионные процессы. Данные лазерного сканирования показывают участки максимального разрушения берега морской волной, которое достигает 20 см за период лето 2016 – осень 2018 гг. (рис. 11).

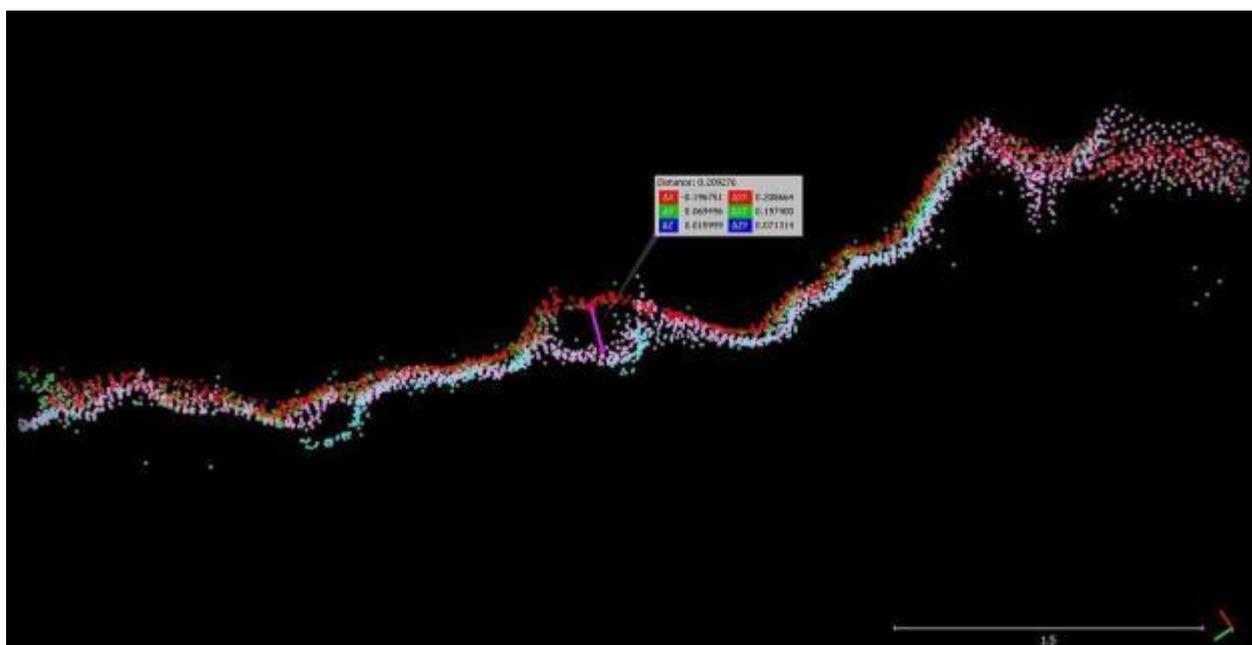


Рис. 11. Участки максимального разрушения берега морской абразией

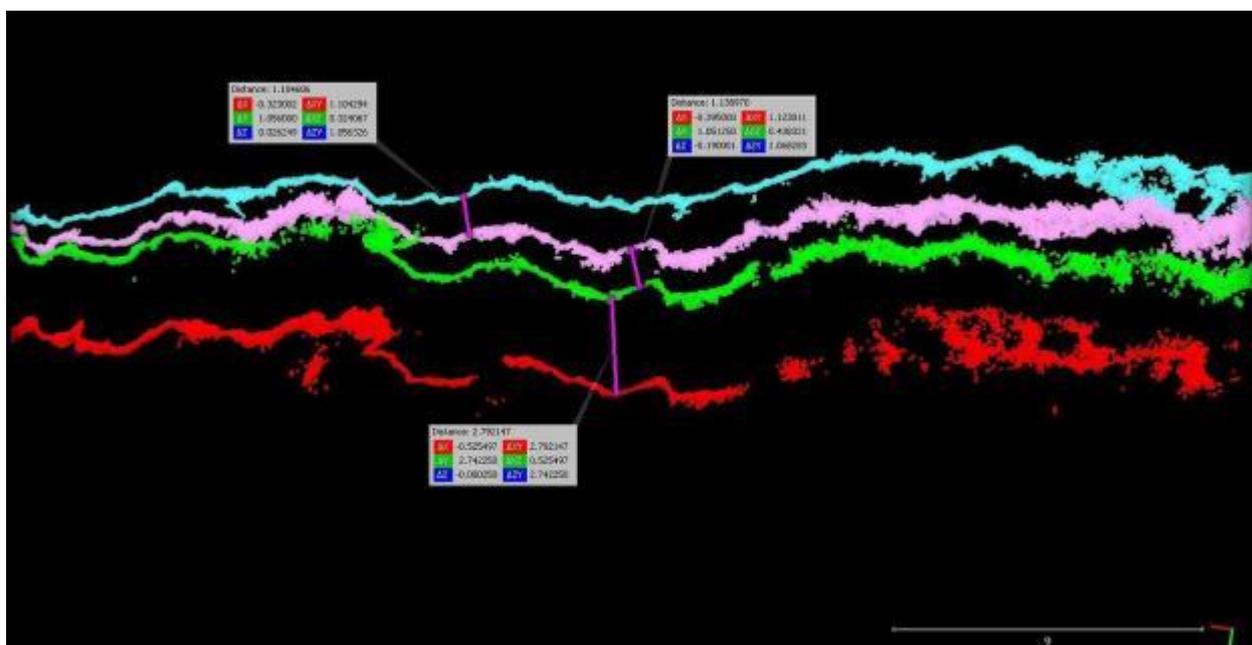


Рис. 12. Схема береговой линии летом 2016 г. (красная линия), летом 2017 г. (зеленая линия), летом (розовая линия) и осенью (голубая линия) 2018 гг.

За указанный период максимальный размыв берега достигал 5 метров. Участки максимального разрушения береговой линии на ЦМР урочища Учкуевка расположены в его средней и западной частях (рис. 12).

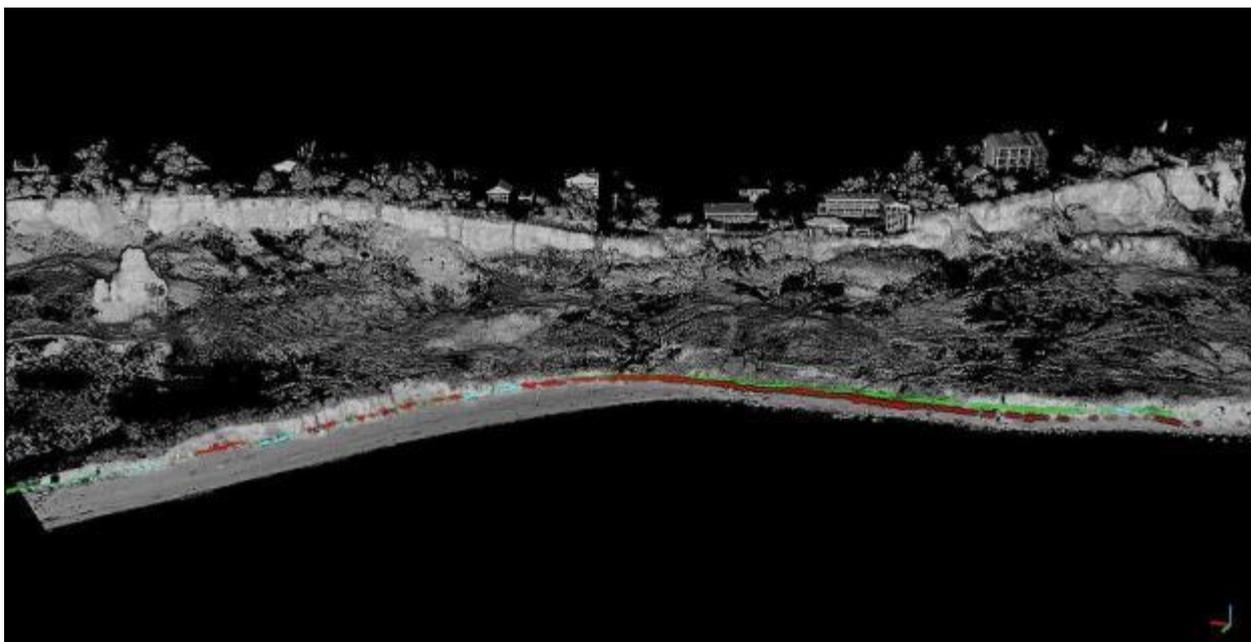


Рис. 13. Участки максимального разрушения береговой линии на ЦМР урочища Учкеевка (красный цвет)

Район Немецкой балки является модельным для оценки как природных процессов отступления берега, так и антропогенного разрушения берегов. По данным, полученным в 2017 и 2018 гг., построены цифровые модели рельефа (рис.14) и совмещенная модель (рис. 15).

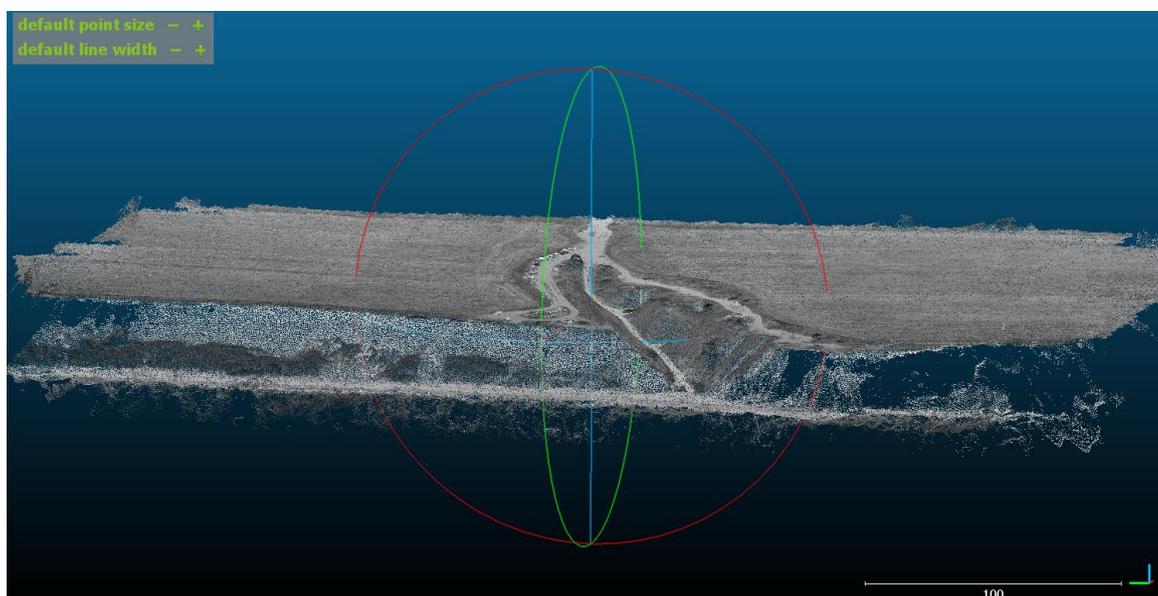


Рис. 14. Цифровая модель обвально-оползневых склонов в районе Немецкой балки

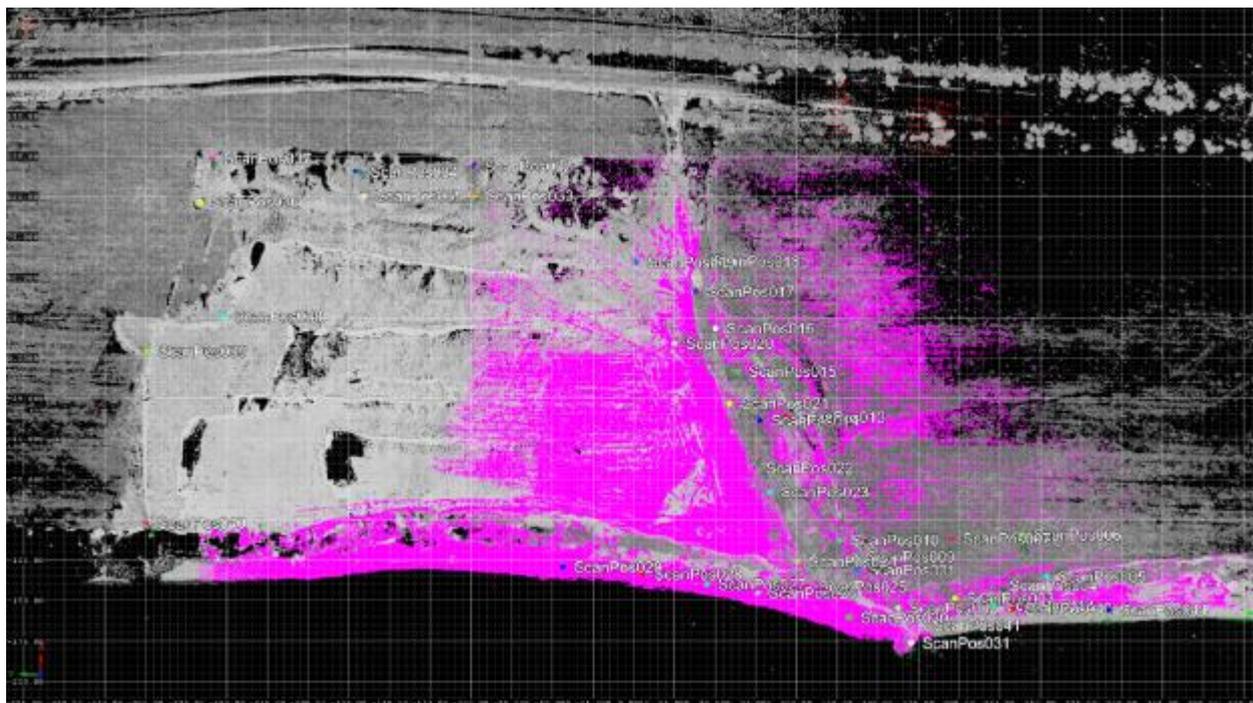


Рис. 15. Совмещенные цифровые модели рельефа района Немецкой балки за 2017 г. (серый цвет) и 2018 г. (розовый цвет)

По данным совмещенных моделей и построенного сечения прослежены изменения рельефа, произошедшие в результате экзогенных процессов и антропогенного вмешательства (рис. 16).



Рис. 16. Сечение совмещенных цифровых моделей района Немецкой балки за 2017 (белый цвет) и 2018 (желтый цвет) года

Как видно из модели, в результате террасирования участка на северном борту Немецкой балки образовался антропогенный «вырез» длиной около 150 м и шириной около 300 м. Глубина «выреза» составила от 10 метров мощности у бровки над пляжем и 2,5 м у края со стороны дороги.

Для определения объема вывезенного грунта и грунта, который образовался в результате оползней и осыпей, была построена объемная фигура, посчитанная между пересечениями поверхностей. Для наглядности фигура была подгружена в облако точек 2018 г. Разница рельефа между 2017 и 2018 гг. показана зеленым цветом (рис. 17).

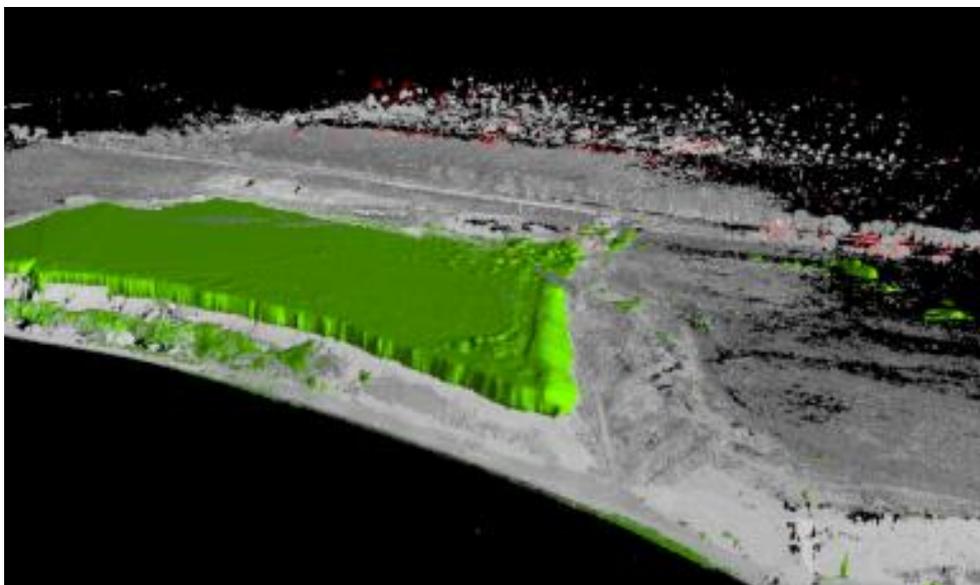


Рис. 17. Фигура с рассчитанным объемом измененного грунта (выделен зеленым цветом)

На основе её расчета объем вывезенного(cut) грунта составил $393\,650\text{ м}^3$, а образовавшегося из-за оползней (fill) $28\,670\text{ м}^3$. Как видно из модели наиболее интенсивные оползневые процессы с наибольшим перемещением грунта происходит вдоль правого борта.

Выводы

1. Лазерное сканирование позволяет с высокой точностью оценить природную и антропогенную динамику берегов Севастополя, отличающихся локализацией различных экзогенных процессов и представляющих угрозу для хозяйственной деятельности населения.

2. Средняя скорость разрушения клифа в районе пляжа Учкучевка составила $0,8\text{ м/год}$. Максимальная скорость разрушения клифа достигла $4,6\text{ м}$, наблюдавшаяся на локальном десятиметровом участке сползания блока отседания.

3. В районе Немецкой балки в результате террасирования образовался антропогенный «вырез» длиной около 150 м , шириной около 300 м и глубиной от $2,5$ до 10 м .

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для мониторинга опасных экзогенных процессов, моделирования и прогнозирования развития берегов и принятия решений для управления природопользованием в прибрежной зоне.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 18-45-920045 p_a

Литература

1. Наименование на русском языке

Арэ Ф.Э. Термоабразия морских берегов. М.: Наука, 1980, 159 с.

Арэ Ф.Э. Основы прогноза термоабразии морских берегов. Новосибирск, Наука, 1985, 172с.

Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. М., изд-во АН СССР, 1962, 710 с.

Игнатов и др., 2016

Муратов М.В. О миоценовой и плиоценовой истории развития Крымского полуострова. Бюлл. МОИП, отд. геол., 1954. Т. 29. Вып.1. С. 3–20.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛОГО ГРУНТА
СТАТИЧЕСКИМ ЗОНДИРОВАНИЕМ**

Соколов И.С.¹, Лагоша Д.В.², Волков Н.Г.¹, Исаев В.С.²

¹ООО «ГЕОИНЖСЕВИС» (международная группа компаний Фугро), Москва,
Россия; *ssi@fugro.ru*

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия;
tpomed@rambler.ru

В статье описаны результаты экспериментов по определению длительной прочности мерзлого грунта в массиве на сжатие и сдвиг по поверхности смерзания с помощью статического зондирования. Проведен анализ изменчивости величины длительной прочности в зависимости от дисперсности и льдистости грунтов. Также выполнено сравнение величины сдвига по поверхности смерзания со сталью с величиной значения срыва муфты зонда статического зондирования после смерзания с массивом грунта.

**LONGTERM STRENGTH MEASUREMENT OF FROZEN SOIL BY CONE PENETRATION
TESTING**

Sokolov I.S.¹, Lagosha D.V.², Volkov N.G.¹, Isaev V.S.²

¹GEOINGSERVICE LLP (Fugro Group), Moscow, Russia; ssi@fugro.ru, ngv@fugro.ru

²Lomonosov MSU, Department of Geocryology, Moscow, Russia; tpomed@rambler.ru

The article provides the results on long-term compressive strength and shear strength measurements of frozen soil by cone penetration testing. The value range of long-term strength is analyzed in the view of particle size and ice content of the studied soils. Shear strength with steel is also compared with the value of clutch failure of the static probe after freezing with the ground mass.

Введение

Промышленное и гражданское строительство в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов активно ведется на протяжении нескольких десятков лет. За это время собран множественный негативный опыт потери устойчивости сооружений в силу особенностей работы мерзлых грунтов в качестве оснований сооружений. В настоящее время наблюдается активизация темпов строительства на Севере, ведется обустройство и разработка новых нефтяных и газовых месторождений Ямала и Гыдана, развитие инфраструктуры северных городов, что требует привлечения новых и эффективных технологий строительства. Источником информации для таких технологий должны служить более точные и детальные методы инженерных изысканий. Механические свойства мерзлых грунтов существенно отличаются от талых в силу наличия в их составе льда. В первую очередь это отчетливое проявление реологии за короткий промежуток времени приложения нагрузки. Степень проявления реологических свойств зависит от физических характеристик мерзлого грунта (льдистости, влажности, криогенной текстуры). Реологические свойства грунтов проявляются в виде ползучести, релаксации и уменьшении прочности во времени при длительном действии нагрузок. В статье рассмотрен вопрос определения длительной прочности мерзлого грунта методом релаксации напряжения в массиве при статическом зондировании.

Методика проведения экспериментов

Эксперименты выполнялись на промышленных площадках в городах Лабытнанги, Салехард, Новый Уренгой и п-ов Гыданский [19, 20] по методике прерывистого задавливания зонда в грунт [13, 18]. Зонд погружался в грунт с постоянной скоростью, однако на заранее заданной глубине выполнялись перерывы. В перерывах задавливания давление масла не сбрасывается для поддержания наконечника зонда строго на постоянной глубине. Каждый перерыв соответствует отдельному испытанию, при

котором производилась запись во времени таких данных, как лобовое сопротивление и боковое трение, а также других дополнительных датчиков зонда, измеряющих поровое давление и температуру.

Процесс релаксации напряжений приводит к нарастанию пластической деформации за счет уменьшения доли упругой при неизменной величине общей суммарной деформации, что и ведет к медленному уменьшению напряжения в силовых датчиках зонда.

Замер продолжался до момента пока показания силовых датчиков оставались неизменными в течение некоторого промежутка времени или постепенно уменьшались на некоторую малую величину (II участок кривой релаксации) [13]. Также при проведении замеров производилась запись температуры с помощью зонда. Фиксация стабильной отрицательной температуры датчика свидетельствует о вмерзании зонда в грунт и производилось измерение величины сдвига по поверхности смерзания муфты зонда с грунтом.

Полученные данные обрабатывались отдельно по датчикам лобового сопротивления и трения грунта по боковой поверхности с применением логарифмического уравнения длительной прочности.

$$\sigma = \frac{\beta}{\ln \frac{t_p+1}{T}} \quad (1)$$

Таким образом, были получены значения длительной прочности грунта. Данные от датчика лобового сопротивления – это длительная прочность грунта на сжатие σ_c , а для данных от датчика трения грунта по боковой поверхности – это величина длительной прочности на сдвиг σ_s .

Результаты определения длительной прочности мерзлых грунтов

Грунты площадок были исследованы на глубину до 50,5 м и представлены песками слабобльдистыми различной крупности, супесями нельдистыми и слабобльдистыми, а также суглинками с различной степенью льдистости. Для грунтов, охарактеризованных на всех площадках исследований, оценивались средние значения σ_c и σ_s длительной прочности (Таблица 1). Выполнено сравнение полученных данных с рекомендуемыми значениями

давления под нижним концом свай (R) и сопротивлением грунта по поверхности смерзания (R_{af}), приведенными в табл. В.1 и В.3 СП 25.13330.2012 [17].

Таблица 1. Сравнение значений длительной прочности глинистых и песчаных грунтов на сжатие и сдвиг с рекомендованными значениями R и R_{af} в СП 25.13330.2012

Грунт		Кол-во замеров	Температура грунта, °С		Глубина замера, м		σ_c , МПа	R , МПа	σ_s , кПа	R_{af} , кПа
Тип	Описание		от	до	от	до				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Суглинок	нелидистый	21	-0,66	-0,33	19,5	50,5	2,43	0,90-1,10	69	40-100
	слабодистый	34	-0,70	-0,18	9,5	25,5	1,34	0,80-0,95	35	40-100
	лидистый	17	-0,36	-0,20	5,4	7,5	0,71	0,40-0,55	19	40-60
Супесь	нелидистая	5	-0,41	-0,15	8,0	19,4	2,23	0,75-1,05	114	40-60
	слабодистая	19	-0,50	-0,12	9,5	32,0	2,18	0,85-1,05	53	40-60
Песок	слабодистый пылеватый	14	-0,60	-0,25	10,0	21,5	1,96	1,00-1,80	23	50-130
	слабодистый мелкий	32	-0,45	-0,12	9,5	25,4	4,58	1,00-1,70	63	50-80
	слабодистый средней крупности	24	-0,16	-0,12	15,4	25,6	6,98	1,50	171	50

Также оценивалась величина касательного напряжения (прочность смерзания муфты трения) зонда после смерзания с массивом грунта в процессе замера релаксации напряжения и температуры (Таблица 2). Для проверки полученных значений были выполнены сравнительные испытания грунтов методом среза по поверхности смерзания со сталью в соответствии с ГОСТ 12248–2012 [15]. Физические характеристики грунтов определялись в соответствии с ГОСТ 5180–2015 [14].

Таблица 2. Сравнение значений срыва муфты зонда после смерзания с массивом грунта со значениями среза по поверхности смерзания со сталью R_{af} по лабораторным данным.

Наименование грунта	Лаборатория	Статическое
---------------------	-------------	-------------

				зондирование	
	$W_{tot}, \%$	$\rho, \text{г/см}^3$	$R_{af}, \text{МПа}$	Количество определени й	$R_{af}, \text{МПа}$
Суглинок слабльдистый	30,7	1,81	0,127	15	0,124
Суглинок льдистый	42,7	1,69	0,078	7	0,093
Супесь нельдистая	19,0	1,97	0,103	2	0,102
Супесь слабльдистая	25,0	1,88	0,073	6	0,089
Песок пылеватый слабльдистый,	20,2	1,92	0,093	4	0,100
Песок мелкий слабльдистый,	21,5	1,86	0,140	9	0,138
Песок средней крупности слабльдистый,	22,0	1,85	0,189	7	0,197

Анализ полученных результатов выявил следующие закономерности:

1. В суглинках и супесях с увеличением льдистости значения σ_c , и σ_s , как и рекомендованные R и R_{af} , снижаются. Это подтверждается теоретическими основами механики мерзлых грунтов, из которых следует, что при увеличении степени льдистости грунта показатели его прочностных свойств уменьшаются при прочих равных условиях.

2. Увеличение дисперсности грунта ведет к уменьшению значений длительной прочности σ_c , и σ_s , равно как и рекомендованных R и R_{af} . Это подтверждается тем, что при увеличении размеров частиц грунта, показатели его прочностных свойств повышаются, при прочих равных условиях.

3. Значения σ_c получились несколько выше рекомендованных значений R в частности: от достаточно близких результатов у песка пылеватого (1,96 и 1,0–1,8 МПа) до расхождения в несколько раз – у песка средней крупности (6,98 и 1,5 МПа). Такая разница в значениях может быть объяснена заниженными рекомендуемыми значениями в [17]. Это косвенно подтверждается рекомендованными значения R для немерзлого песка средней крупности, приведенные в [16], которые варьируют в диапазоне 4,0–5,2 МПа для рассматриваемых глубин погружения нижнего конца сваи. Данные рекомендованные значения для немерзлых песков (4,0–5,2 МПа) значительно превышают рекомендуемые значения для мерзлых песков (1,0–1,8 МПа).

4. Значения σ_s полученные по методике [13], (23–171 кПа) и рекомендованные R_{af} (40–130 кПа), оказались достаточно близкими. Среднее значение длительной прочности σ_s песка мелкого укладывается в диапазон значений R_{af} (63 и 50–80 кПа). Значения длительной прочности σ_s для песка пылеватого слабодистого (23 кПа) и суглинка льдистого (19 кПа) оказались меньше рекомендованных значений R_{af} (50–130 и 40–60 кПа, соответственно). Для супеси нельдистой и песка средней крупности слабодистого значения σ_s оказались немногим выше рекомендованных значений R_{af} (40–60 и 50 кПа, соответственно).

5. Значения касательного напряжения при вдавливании зонда после смерзания с массивом грунта показали хорошее совпадение со значениями среза по поверхности смерзания со сталью R_{af} , для охарактеризованных типов грунтов. Однако значения смерзания оказались несколько выше значений длительной прочности на сдвиг σ_s .

Заключение

На основе разработанной методики определения длительной прочности мерзлого грунта статическим зондированием были выполнены испытания на промышленных площадках с различными типами мерзлых грунтов. Полученные результаты определения величины длительной прочности не противоречат теоретическим основам механики мерзлых грунтов и накопленному опыту полевых испытаний несущей способности свай в мерзлых грунтах, обобщенному в СП 25.13330.2012. Проведены лабораторные исследования физико-механических характеристик грунтов, охарактеризованных на площадках исследования, и выявлено хорошее совпадение результатов среза по поверхности смерзания со сталью в лабораторных условиях с величиной касательного напряжения при вдавливании зонда после смерзания с массивом мерзлого грунта. Показана возможность установления прочностных характеристик массива мерзлых грунтов статическим зондированием на глубину до 50 м.

Литература

13. Волков, Н.Г., Соколов, И.С. Расчет несущей способности свай на основе определения длительной прочности в массиве мерзлых грунтов методом статического зондирования / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Геотехника. – 2019. – № 1. – С. 68–78.
14. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введен 2016-04-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.

15. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Введен 2012-01-01 – М.: Стандартиформ, 2011. – 78 с.
16. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 – М.: Госстрой, 2011 – 116 с.
17. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 – М.: Госстрой, 2012 – 123 с.
18. СТО 36554501–049–2016 Применение статического зондирования для контроля оснований в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. – М.: ОАО «НИЦ «Строительство», 2016. – 58 с.
19. Volkov, N., Sokolov, I., Jewell, R. Cone penetration testing of permafrost soils / N. Volkov [and etc.] // Proceedings 5th European Conference on Permafrost. – 2018. – pp. 215–216.
20. Volkov, N., Sokolov, I., Jewell, R. CPT Testing in Permafrost. Proceedings 4th International Symposium on Cone Penetration Testing / N. Volkov [and etc.] // – CPT'18. – Netherlands, Delft – 2018. – pp. 1258–1268.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ТЕРМОАБРАЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УРАЛЬСКОМ БЕРЕГУ БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ

Аманжуров Р.М.¹, Исаев В.С.¹, Горшков Е.И.¹, Сибирякова А.И.¹, Шевчук Я.О.¹

¹Геологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, кафедра геокриологии,
rusaman@gmail.com

Целью данного исследования являлся мониторинг динамики береговых процессов с применением методов наземного лазерного сканирования. Объектом мониторинга – Уральский берег Байдарацкой губы Карского моря, деградирующий в результате термоабразионных процессов.

Полученные результаты могут быть использованы для мониторинга опасных экзогенных процессов, а также моделирования и прогнозирования развития этих процессов.

Ключевые слова: Наземное лазерное сканирование, побережье, термоабразионные процессы.

USAGE OF TERRESTREAL LASER SCANNING TO ASSESS THE DYNAMICS OF
THERMOABRASION PROCESSES ON THE URAL BANK OF THE BAYDARATSKAYA
BAY

Amanzhurov R.M.¹, Isaev V.S.¹, Gorshkov E.I.¹, Sibiryakova A.I.¹, Shevchuk Y.O.¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; *rusaman@gmail.com*

Key words: Ground laser scanning, coast, thermal abrasion processes.

The aim of this study was to monitor the dynamics of coastal processes using terrestreal laser scanning methods. The object of monitoring is the Ural coast of the Baidarat Bay of the Kara Sea, which is degrading as a result of thermo-abrasion processes.

The results can be used to monitor dangerous exogenous processes, as well as to model and predict the development of these processes.

Введение

В настоящее время имеется большое количество литературных данных по изучению процессов, развивающихся на побережье Арктических морей. По мнению исследователей прибрежных арктических регионов (Арэ, 1980; Романовский, 1993; Жигарев, 1997; и др.) основным разрушающим процессом является термоабразия. Этот процесс наносит большой ущерб прибрежной инфраструктуре. Так, до начала строительных работ на Уральском берегу Байдарацкой губы под воздействием комплекса береговых и термоденудационных процессов (термоабразии, термоэрозии, термокарста и пр.) отступление происходило со среднемноголетней скоростью 1,7 м/год (Камалов и др., 2006), а строительство коффердамов привело к увеличению скорости отступления берега до 3-4 м/год (Ермолов, 2013). Средняя скорость отступления берегов, сложенных льдистыми мерзлыми толщами, составляет 5-10 м в год (Немцев, 2006). В связи с этим актуальной задачей является применение комплексных геодезических методов для оценки скорости отступления берегов.

Байдарацкая губа (рис. 1) расположена между Югорским полуостровом и полуостровом Ямал, являясь одним из наиболее крупных заливов Карского моря. Она вытянута с северо-запада на юго-восток. Длина губы около 180 км. Ширина у входа 78 км. Глубина до 20 м.

Исследуемый участок Уральского берега расположен близ п. Яры и приурочен к холмисто-увалистой сильно заозеренной и заболоченной местности. Прибрежные отложения характеризуются высокой льдистостью и наличием линз подземного льда. Участок берегового обрыва сложен песчано-суглинистыми отложениями, включающими залежи пластового льда видимой мощностью 3-4 м.

Береговой обрыв подвержен термоабразии. Механическое действие волн и тепляющее действие воды приводят к высокому суммарному эффекту переработки берега.

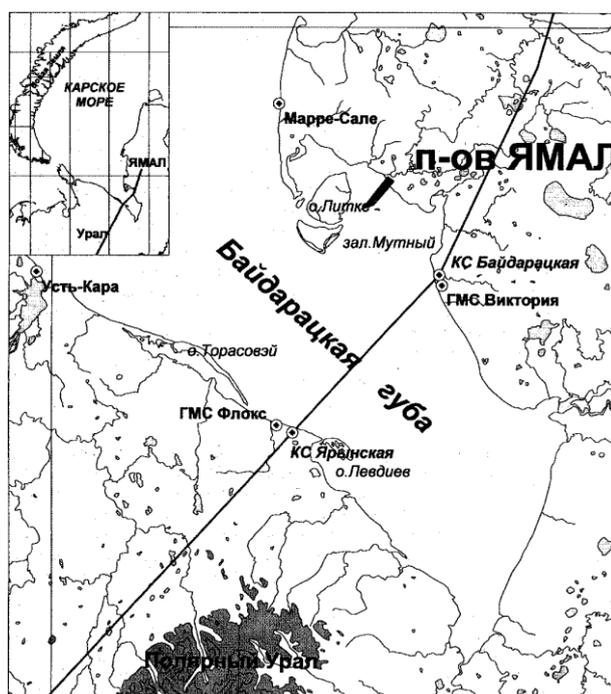


Рисунок 1. Байдарацкая губа Карского моря (Природные условия...,1997).

Материалы и методы исследования

Уральский берег Карского моря на участке перехода газопровода через Байдарацкую губу (участок исследования) представляет собой террасированную прибрежно-морскую аккумулятивно-абразионную равнину (рис. 2).

Мониторинг выполнялся на низком (рис. 3), сложенным глинистыми отложениями (2-9 м) и высоком (рис. 4), сложенным песчанистыми отложениями (15-16 м) участках I морской террасы, отделенными от уровня лайды и берега моря ясно выраженным уступом крутизной склона 6-7° и подвергающимся абразионному воздействию штормовых волн с образованием стенок отрыва.

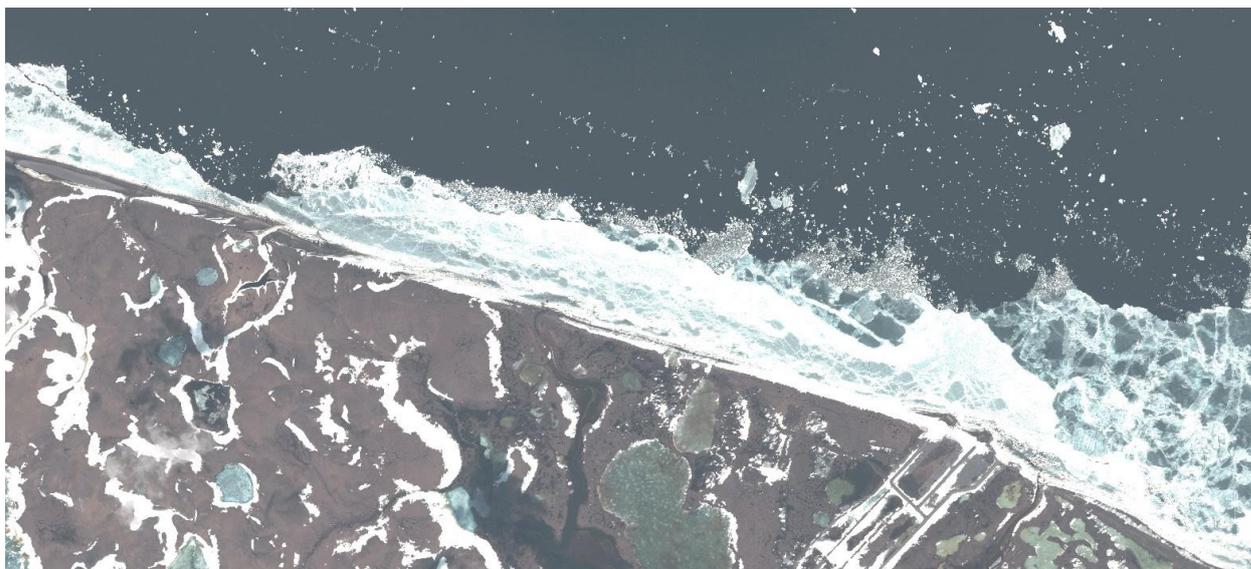


Рисунок 2. Исследуемый участок (Google maps).

Терраса представляет собой поверхность с кочковатым полигонально жильным бугристым рельефом с заболоченными понижениями и многочисленными карстовыми озерами, а также эрозионными врезами вдоль берега моря.



Рисунок 3. Низкий берег (фото автора).



Рисунок 4. Высокий берег (фото автора).

Изучение динамики геоморфологического отступления берега проводилось методом наземного лазерного сканирования (НЛС) с использованием трехмерной лазерной сканирующей системы. Морфометрический и структурный анализ разновременных данных НЛС позволяет получать пространственно распределенные характеристики скорости, направления и объема смещенного по склонам материала (Селезнева, 2013).

Лазерное сканирование производилось в сентябре 2018 и 2019 гг. В результате измерений были получены точки лазерных отражений (рис. 5), для которых вычислены пространственные координаты (x , y , z), форма и интенсивность отраженного сигнала. Полученные данные были использованы для построения пространственных цифровых моделей измеряемых объектов. Для обработки данных и построения цифровой модели рельефа использован программный пакет Cloud Compare.

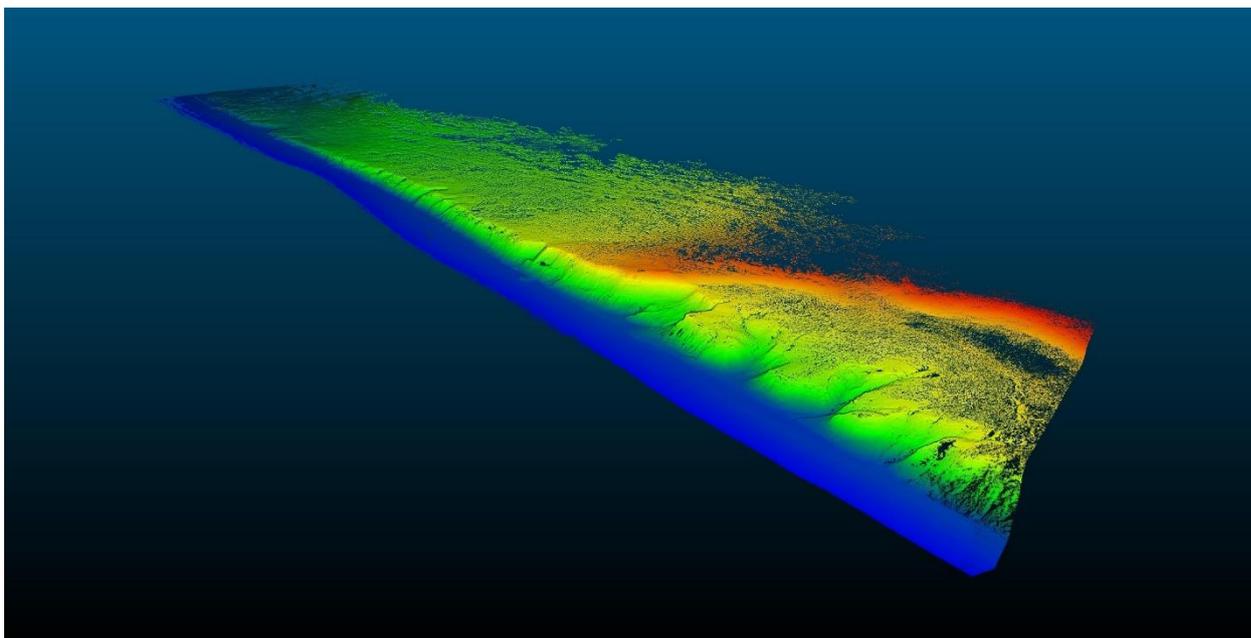


Рисунок 5. Облако точек по результатам лазерного сканирования.

Результаты исследования

На основе полученных данных были построены цифровые модели термоабразионного берега за 2018 и 2019 гг (рис 6,7).

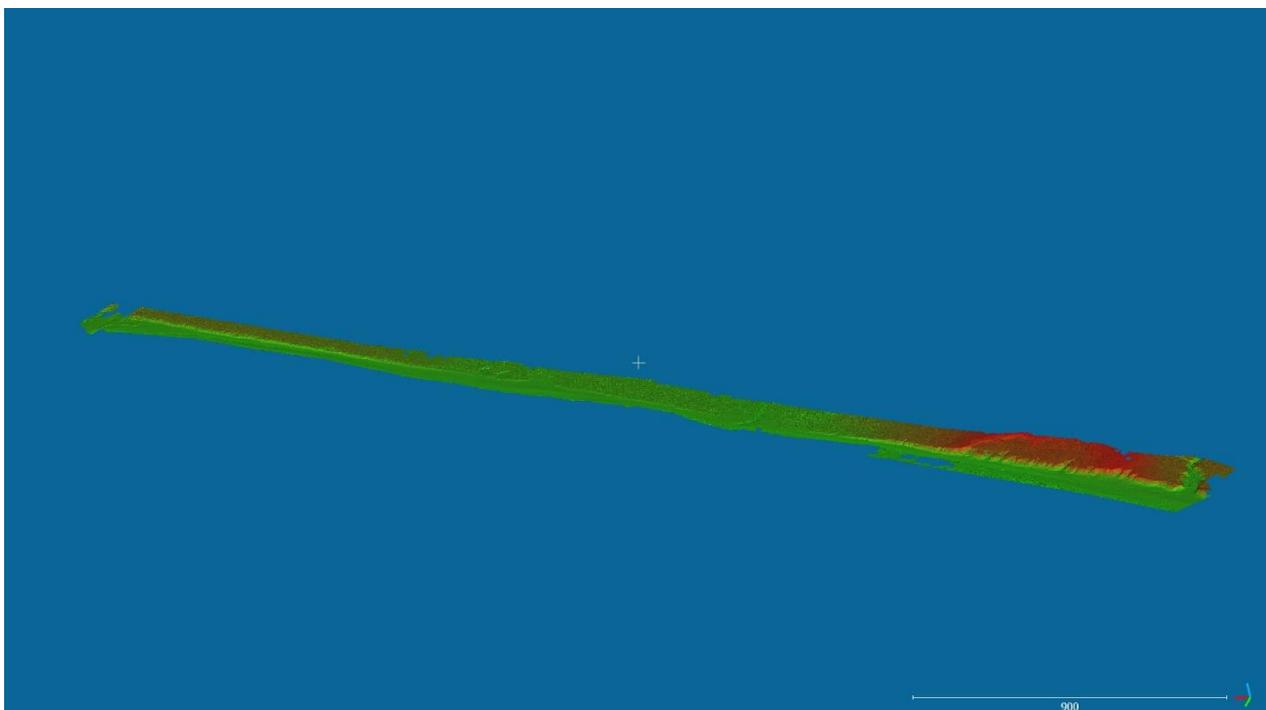


Рисунок 6. Облако точек по результатам лазерного сканирования 2018 г.

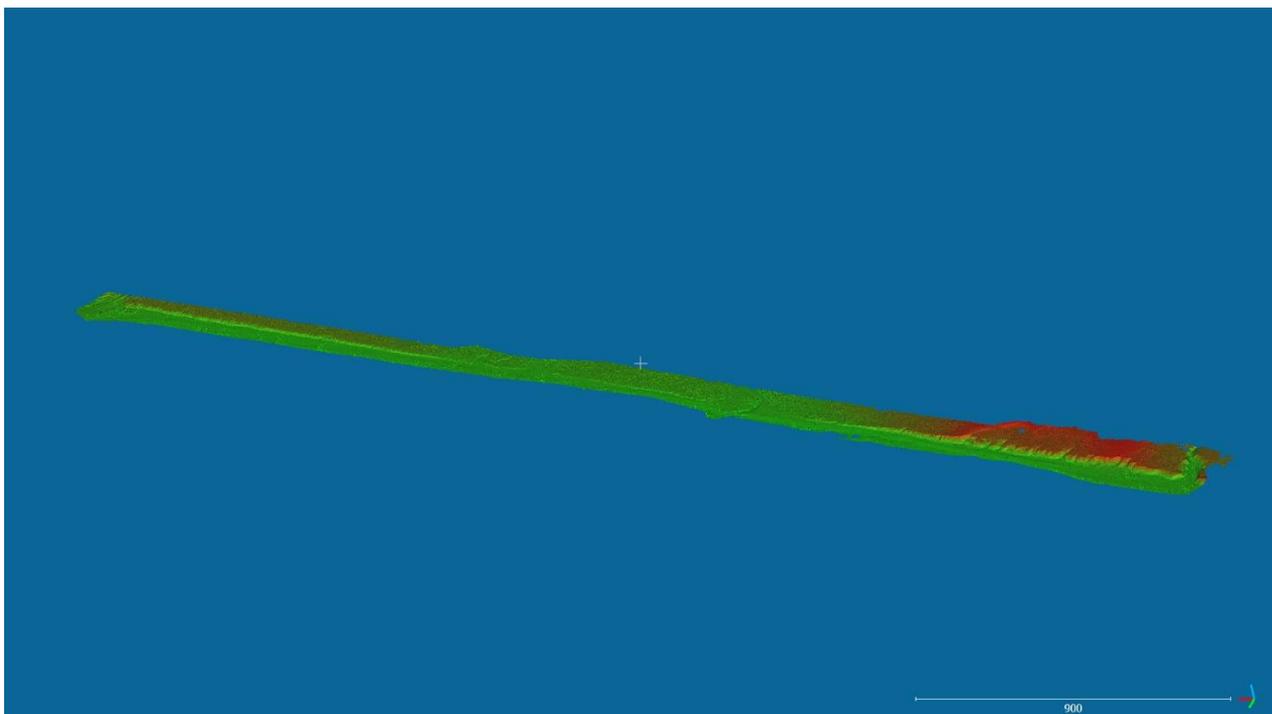


Рисунок 7. Облако точек по результатам лазерного сканирования 2019 г.

Для оценки динамики изменения рельефа побережья Байдарацкой губы было построено 3 профиля на совмещенных облаках (рис. 8).

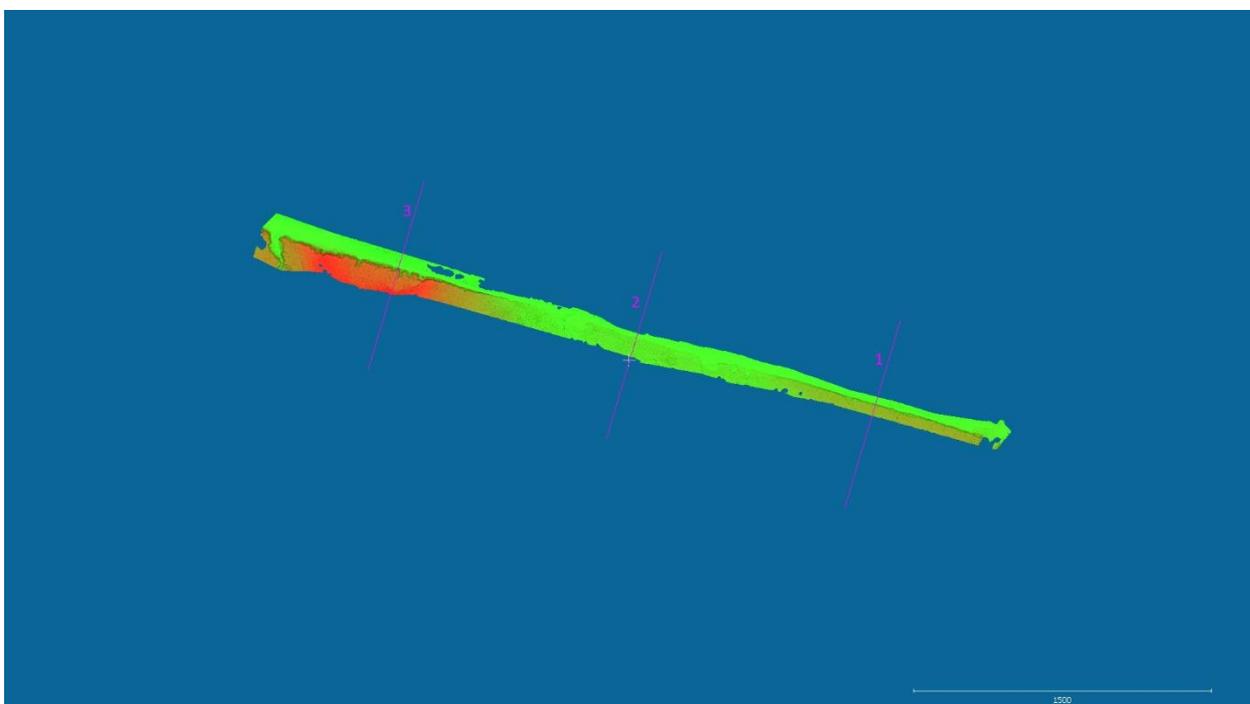


Рисунок 8. Расположение профилей на облаке точек по результатам лазерного сканирования 2019 г.

По данным совмещенной модели и построенного сечения были прослежены изменения рельефа, произошедшие в результате экзогенных процессов (рис. 9, 10, 11).

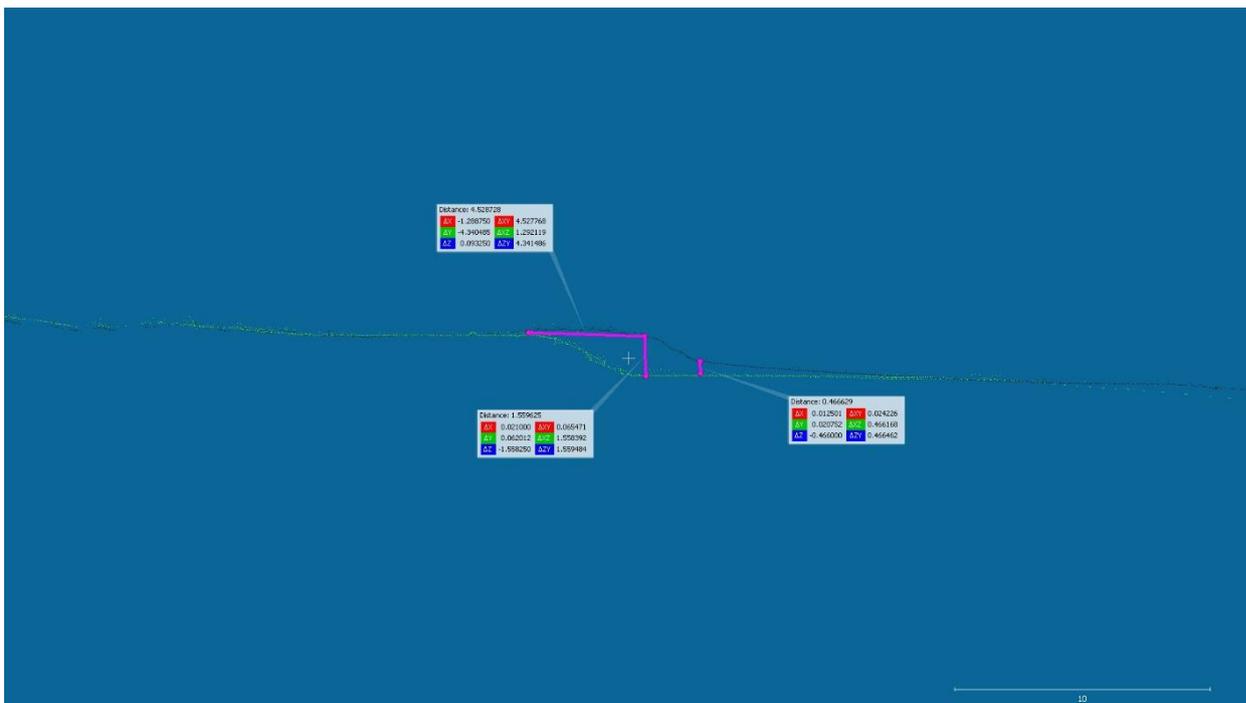


Рисунок 9. Профиль 1.

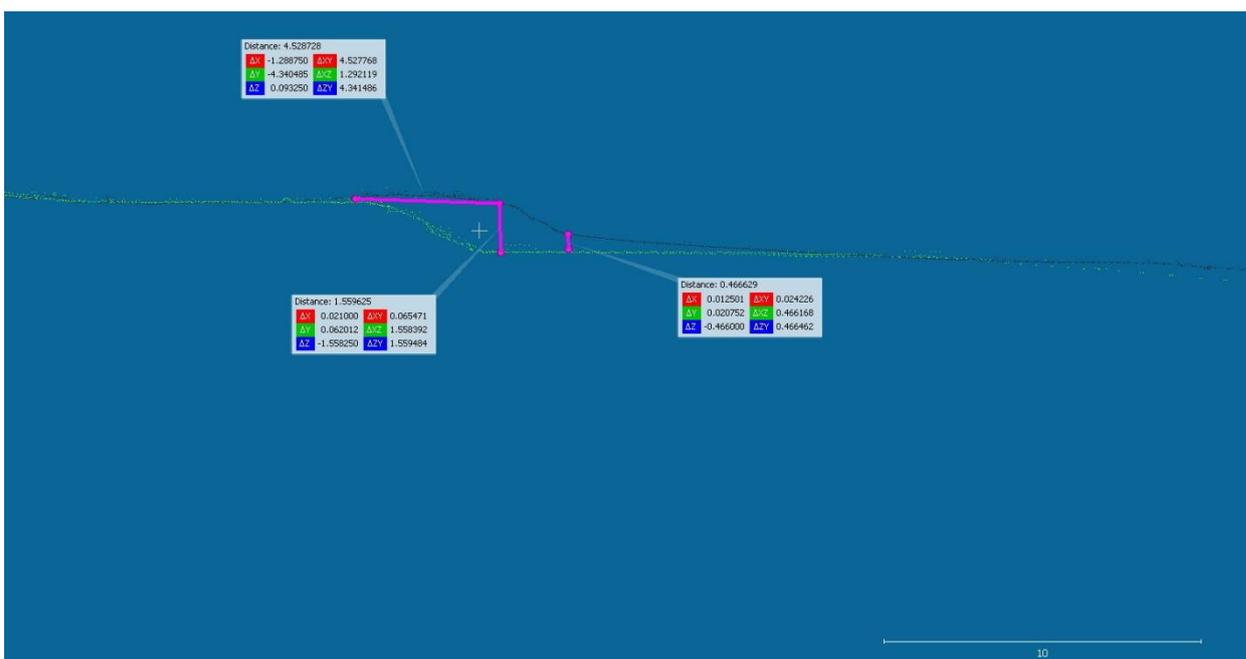


Рисунок 10. Профиль 2.

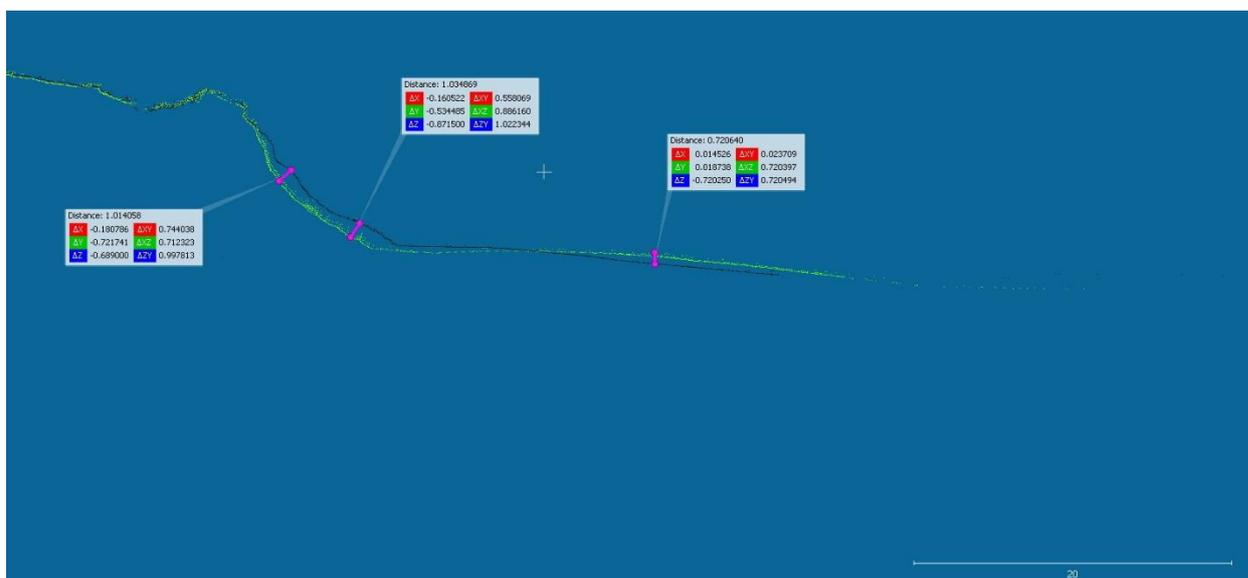


Рисунок 11. Профиль 3.

Выводы:

1. Лазерное сканирование позволяет с высокой точностью оценить динамику различных экзогенных процессов.
2. Средняя скорость отступления берега составила 0,8 м/год.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для мониторинга опасных экзогенных процессов, моделирования и прогнозирования развития берегов.

Литература

1. Ермолов А.А., Прядилин Р.Ю. Особенности производства мониторинга геологических и литодинамических процессов на участке строительства перехода магистральных газопроводов через Байдарацкую губу Карского моря. Инженерные изыскания, изд-во Геомаркетинг, 2013, №10-11.
2. Камалов А.М и др. Морфолитодинамика берегов и дна Байдарацкой губы на трассе перехода магистральными газопроводами. Криосфера Земли, 2006, том 10, №3.
3. Немцев Е.С. Геокриологические условия побережья на участках перехода газопровода «Ямал-центр» через Байдарацкую губу. Вестник, июнь, 2006, №6.
4. Природные условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных трубопроводов Ямал-Центр. М.: ГЕОС, 1997. 432 с.
5. Селезнева Е.В. Применение лазерного сканирования в геоморфологических исследованиях. Вестник Московского университета, сер. 5, география, 2013, №2.

ПЕРВИЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ

Болотюк М.М.¹, Комаров И.А.¹, Исаев В.С.¹, Кальберген Р.Г.², Карпенко Ф.Ф.²

¹ Кафедра геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова;

² Институт геоэкологии РАН, Москва, Россия;

Отработана методика экспериментального лабораторного определения величин порового давления с помощью различных датчиков и осуществлена серия тестовых экспериментов на водонасыщенных дисперсных грунтах различного состава. Первичные результаты представлены в статье.

PRIMARY RESULTS OF LABORATORY STUDIES ON POROUS PRESSURE'S DYNAMICS IN PROCESSES OF SOIL FREEZING

Bolotyuk M.M.¹, Komarov I.A.¹, Isaev V.S.¹, Kalbergenov R.G.², Karpenko F.F.²

¹ Geocryology department, Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University;

² Institute of Geoecology RAS, Moscow, Russia;

A methodology for experimental laboratory determination of pore pressure values using various sensors was developed and a series of test experiments were carried out on water-saturated soils of various compositions. Primary results are presented in the article.

Измерение отрицательного порового давления воды имеет важное значение при изучении поведения грунтов в условиях замерзания. В настоящее время доступны и используются различные сенсоры для измерения порового давления в незамерзающих грунтах незамерзшем состоянии при неполном влагонасыщении [1, 2]. Возможность использования этих сенсоров для измерения отрицательных поровых давлений воды при одностороннем промерзании образца грунта обсуждается в данной работе.

Эксперименты проводились на базе лабораторного корпуса ИГЭ РАН им Сергеева. Для исследований использовалась разработанная сотрудниками лаборатории малогабаритная термокамера, принципиальная схема которой опубликована в работе [3].

Термокамера суховоздушная (рисунок 1) с термостатом, имеющим погружной блок управления “KRIO-VT-09”, предназначена для исследований свойств грунтов при различных температурах. Размеры термокамеры: высота 970 мм; ширина 830 мм; глубина 700 мм. Диапазон регулирования температуры от -8°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Время выхода термокамеры от $+20^{\circ}\text{C}$ на режим установленной температуры -8°C составляет 3 часа, $+80^{\circ}\text{C}$ – 24 часа. Точность поддержания температуры $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 1. Общий вид термокамеры с записью параметров опыта на компьютер (1 – термокамера суховоздушная; 2 – термостат; 3 – блок регистрации; 4 – блок питания; 5– источник бесперебойного питания; 6 – компьютер).

В термокамеру помещались заранее подготовленные образцы водонасыщенного песка и суглинка нарушенного сложения цилиндрической формы с размерами 11см в диаметре и 22см высотой (рисунок 2 а).

В геометрический центр образца через заранее высверленные отверстия внедрялись подключенные к системе регистрации сигналов датчики температуры и давления. Также для дополнительного контроля температуры один датчик размещался непосредственно в камере.

Для регистрации сигналов с датчика использовался Модуль АЦП ЦАП ZET 210 предназначенный для оцифровки и измерений параметров сигналов постоянного уровня и переменного напряжения, поступающих с различных первичных преобразователей.

В качестве датчика порового давления применялся Festo pressure transmitter SPTE-P10R-S6-B-2.5K (рис.2 б), который предназначен согласно назначению для определения относительного давления в применениях с использованием пневматического оборудования. Датчик SPTE преобразует значения давления в электрический аналоговый сигнал, который может быть использован для функций управления и регулирования.

Датчик удлинялся путем наращивания силиконовой трубки, пространство внутри нее заполнялось незамерзающей жидкостью, после чего датчик внедрялся в образец грунта таким образом, чтобы конец трубки располагался в геометрическом центре цилиндра и жидкость не попадала в межпоровое пространство грунта.

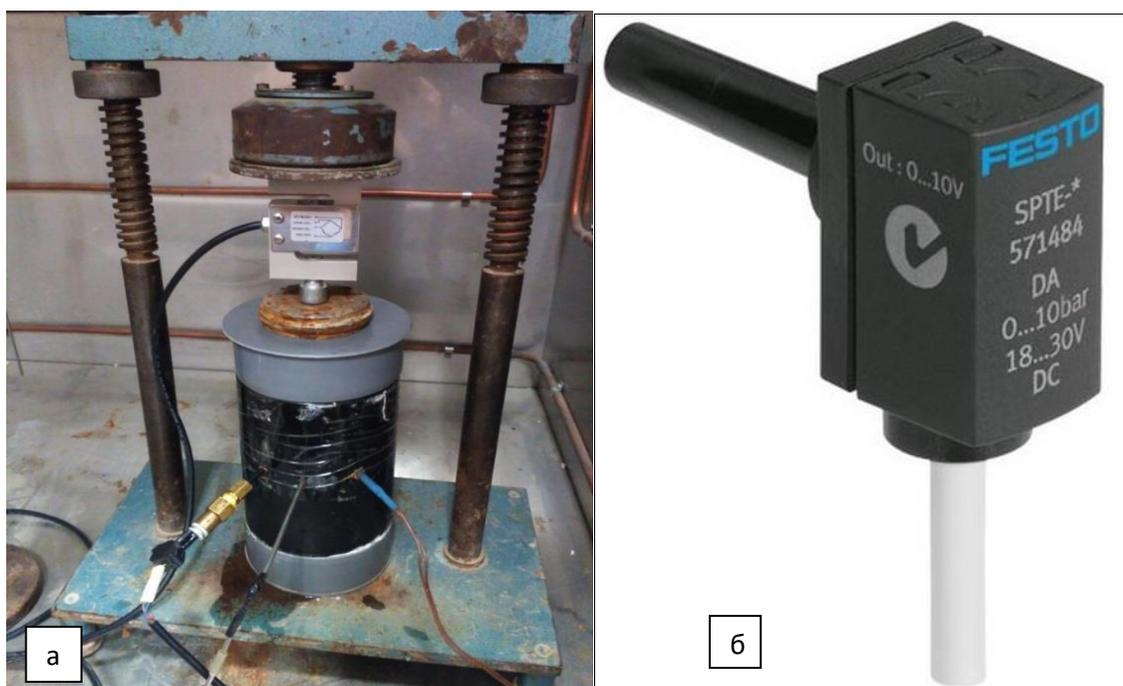


Рисунок 2. Подготовленный к эксперименту образец суглинка (а); Датчик давления Festo pressure transmitter SPTE-P10R-S6-B-2.5K (б)

Эксперименты проводились на каждом из образцов с тройной повторностью. Один этап эксперимента включал в себя цикл промораживания образца до установленной внутри камеры температуры ($-4\text{ }^{\circ}\text{C}$) и последующий цикл оттаивания. Регистрация значений температуры и давления велась непрерывно на протяжении всего эксперимента.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунках 3-7.

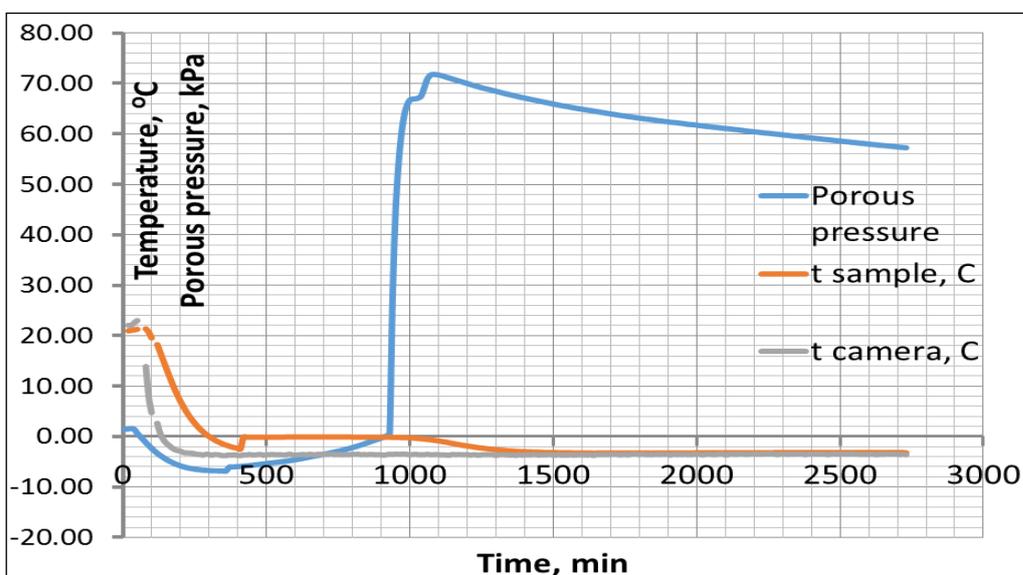


Рисунок 3. График изменения температуры и порового давления в образце суглинка в ходе процесса промерзания (эксперимент 1).

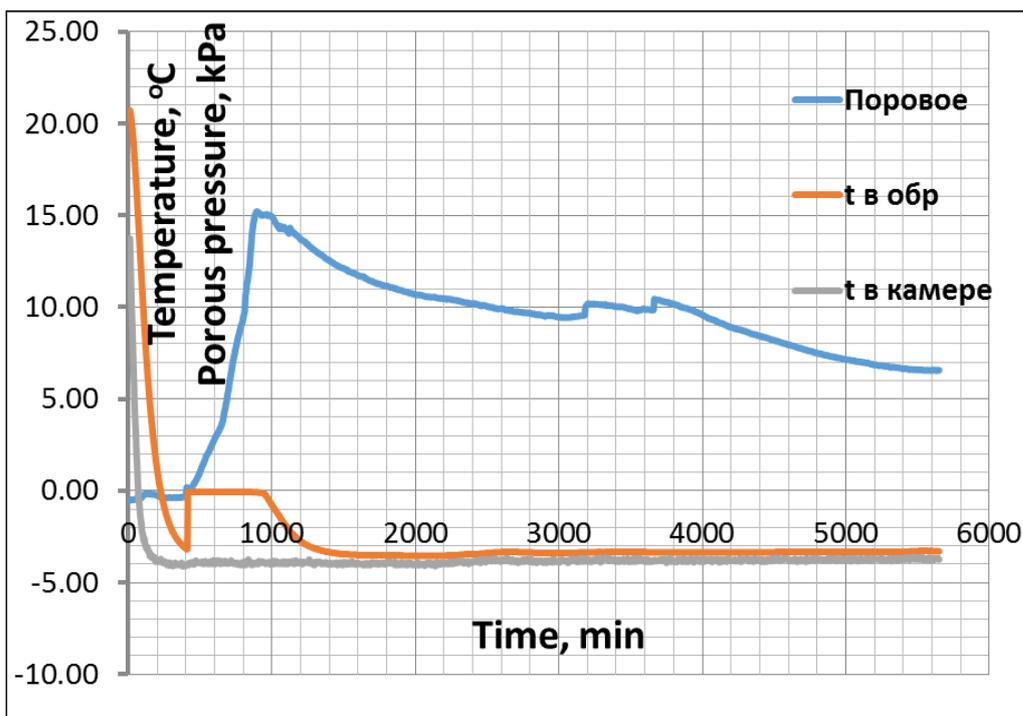


Рисунок 4. График изменения температуры и порового давления в образце суглинка в ходе процесса промерзания (эксперимент 2).

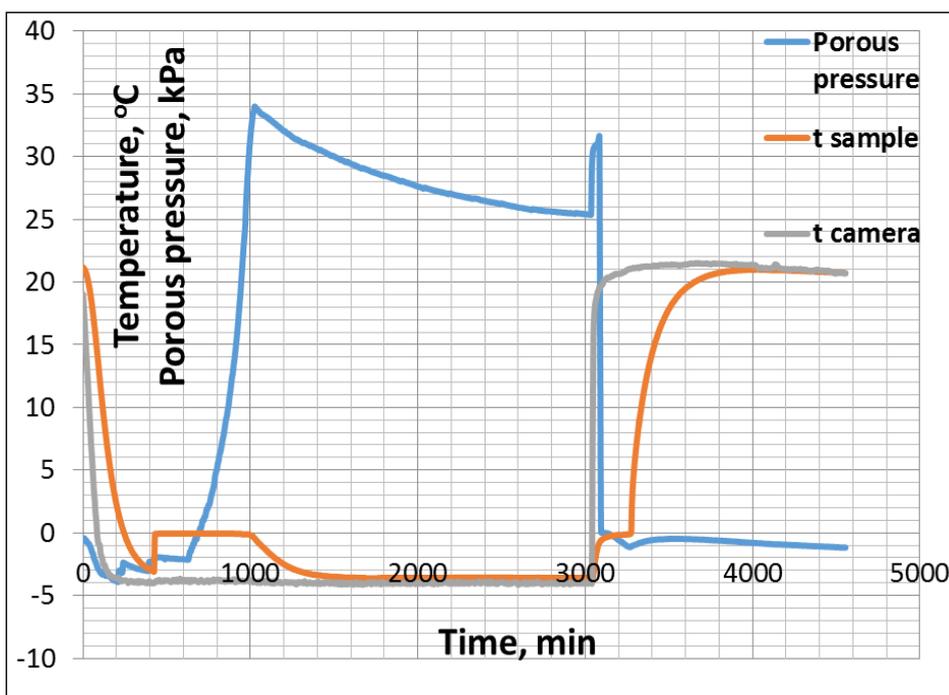


Рисунок 5. График изменения температуры и порового давления в образце суглинка в ходе процесса промерзания и последующего оттаивания (эксперимент 3).

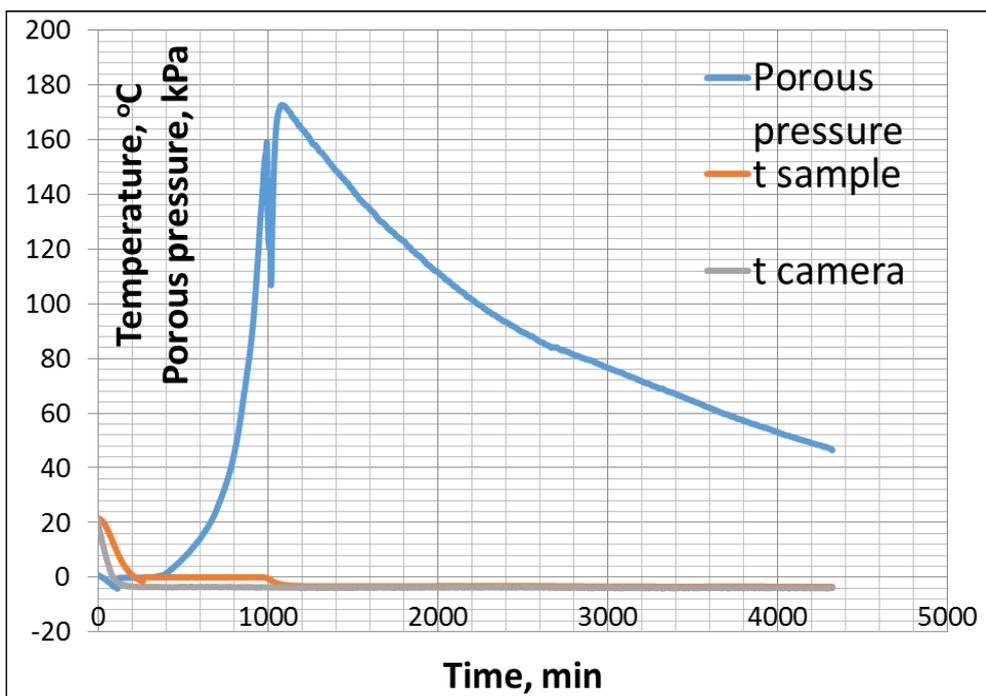


Рисунок 6. График изменения температуры и порового давления в образце песка в ходе процесса промерзания (эксперимент 4).

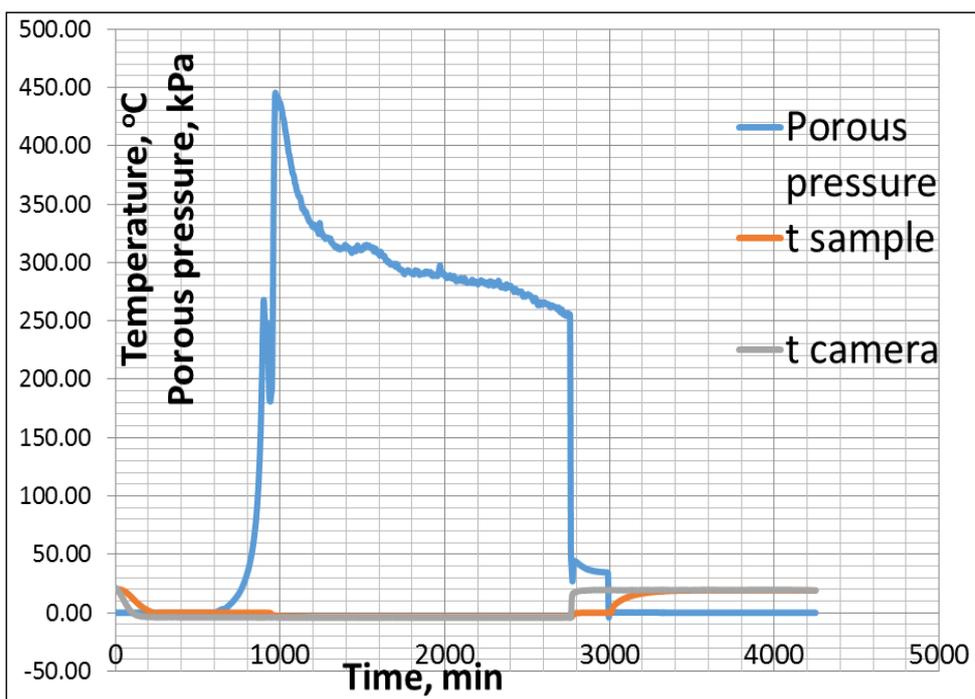
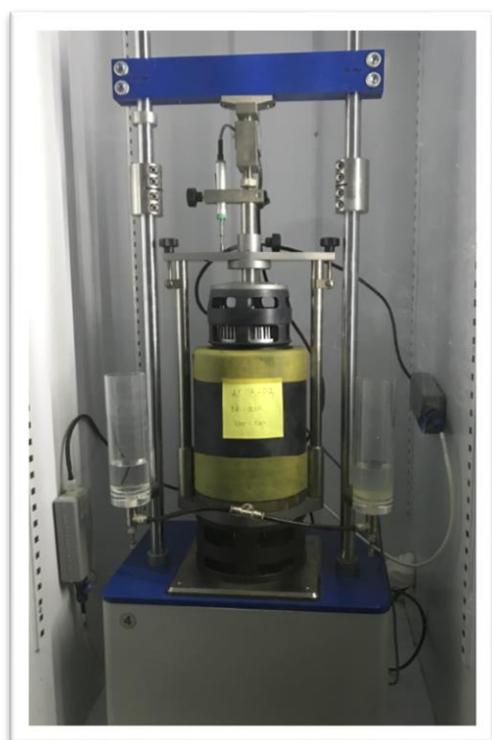


Рисунок 7. График изменения температуры и порового давления в образце песка в ходе процесса промерзания и последующего оттаивания (эксперимент 5).

В результате проведенных экспериментов используемый датчик давления продемонстрировал возможность применения для решения подобных задач, однако полученные данные оказались слишком неоднозначными для адекватного качественного или количественного анализа результатов эксперимента. Так в экспериментах 1 и 3 на образцах суглинка с началом охлаждения начинают уменьшаться и значения порового давления, достигая отрицательных значений в -6,8 и -3,7 кПа соответственно. Затем с

началом кристаллизации поровой влаги в грунте значения порового давления начинают стремительно расти, в 1 эксперименте достигнув значений в 72 кПа, 15 кПа в эксперименте 2 и 34 кПа в третьем, притом, что эксперименты проводились по одной и той же методике в одинаковых условиях. Так же и в экспериментах 4 и 5 на образце песка максимальные значения порового давления в процессе промерзания достигли 170 и 440 кПа соответственно. По-видимому, такая существенная разница значений обусловлена техническими нюансами применения датчика в решении задач, связанных с процессом промерзания. Для более четкого понимания факторов, повлиявших на результаты эксперимента, необходимы дополнительные исследования.

Следующим этапом лабораторных исследований является перенос отработанной методики на более современную установку и ее модернизация под задачи исследований. Новая установка испытаний на морозное пучение выполнена на базе универсального испытательного комплекса АСИС компании ГеоТек. Общий вид и некоторые технические характеристики установки, заявленные производителем приведены на рисунке 8.



ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ:

Наименование	Значение
Предельная вертикальная нагрузка, кН	1
Минимальная степень вертикальной нагрузки, кПа	1,5
Температура на верхней плите, °С	-4 +/- 0,2
Температура на нижней плите, °С	+2 +/- 0,2
Вертикальные деформации, мм	20
Диаметр образца, мм	100

Рисунок 8. Общий вид и технические возможности установки для испытания дисперсных грунтов на морозное пучение.

Преимуществами данной установки в базовом исполнении является: возможность реализации одностороннего промерзания; управление температурой на верхнем и нижнем торцах образца; управление вертикальной нагрузкой; подача жидкости с нижнего торца образца, что позволяет осуществлять эксперимент как с подтоком влаги, так и без него; измерение деформаций вертикального морозного пучения; измерение температуры внутри образца на глубине 100 мм. Поскольку изначально установка оснащена только одним датчиком температуры в центре образца, для получения более информативных данных

было принято решение дооснастить установку датчиками температуры и порового давления, попарно расположенными по высоте образца.

На сегодняшний день работы по дооснащению установки находятся в завершающей стадии и в скором времени будут начаты серийные эксперименты, которые дадут более подробную информацию о динамике температурных полей и порового давления в образце в процессе одностороннего промерзания пород различного состава и свойств.

Литература:

1. Pore pressure measurements during freezing of an overconsolidated clayey silt, J.T.C. Seto, J.-M. Konrad, Cold Regions Science and Technology, V. 22, 1994, pp. 319-338
2. Measuring Negative Pore Water Pressures in a Freezing Environment, D. G. Fredlund, J. K. Gan, H. Rahardjo, TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, 1991, V. 1307, pp.291-299
3. Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала / Баулин В.В., Кальбергенов Р.Г. и др., том. II., Тюмень 1986, 99 с